

YAYINCI
PUBLISHER



MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ

**JOURNAL OF ENGINEERING
SCIENCES AND DESIGN**

e-ISSN: 1308-6693

Cilt/Volume: 10 Sayı/Issue: 1 Mart/March 2022



İmtiyaz Sahibi / Owner

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

Editörler / Editors

Gultekin OZDEMIR

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

Mehmet AVCAR

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

Erdal AYDEMİR

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

Turgay AYDOĞAN

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

Ali AGCAL

Suleyman Demirel University, Isparta

Cağlayan BALKAYA

Suleyman Demirel University, Isparta

Atilla BAYRAM

Van Yuzuncu Yıl University, Van

Sehnaz Sule KAPLAN BEKAROĞLU

Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Ali BELEN

Artvin Coruh University, Artvin

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

Karani KURTULUŞ

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

Fatih Ahmet ŞENEL

Suleyman Demirel University, Isparta

Hakan TONGAL

Suleyman Demirel University, Isparta

Volkan UZ

Izmir Institute of Technology, Izmir

Mehmet Ali YALCINKAYA

Kırşehir Ahi Evran University, Kırşehir

Kerim YAPICI

Suleyman Demirel University, Isparta

Demet YILMAZ

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

Elif Merve KUCUKONER

Suleyman Demirel University, Isparta

Sıla YAMAN

Suleyman Demirel University, Isparta

Dizin ve İndeksler / Abstracting & Indexing

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

İçindekiler / *Contents*

Araştırma / *Research*

[1. PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF B4C REINFORCED AA7075 COMPOSITE METALLIC FOAM](#)

Güzide Meltem LÜLE ŞENÖZ, Rabia ÇINAR DAŞKESEN

Sayfa: 1-6 [PDF](#)

[2. GEREDE-KAVACIK BÖLGESİ BAZALTLARININ ENDÜSTRİYEL KULLANIMI AÇISINDAN UYGUNLUĞUNUN BELİRLENMESİ](#)

Taşkın Deniz YILDIZ, Ali Haydar GÜLTEKİN, Şenel ÖZDAMAR

Sayfa: 7-27 [PDF](#)

[3. BUHAR KÜRÜNÜN UÇUCU KÜLLÜ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN KISA VE UZUN SÜRELİ BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ](#)

Şirin KURBETCİ

Sayfa: 28-37 [PDF](#)

[4. A NOVEL BI-OBJECTIVE MODEL FOR A MULTI-PERIOD MULTI-PRODUCT CLOSED-LOOP SUPPLY CHAIN](#)

Nadi Serhan AYDIN

Sayfa: 38-49 [PDF](#)

[5. BİR DOLGU BARAJIN REZERVUARINDAKİ SUYUN ANİ ÇEKİLMESİ SIRASINDAKİ STABİLİTE ANALİZİ](#)

Emre TOPÇU, Baki BAĞRIAÇIK, Ahmet ERDAĞ

Sayfa: 50-60 [PDF](#)

[6. ASFALT KAPLAMALARDA TABAKA KALINLIĞININ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI](#)

Erol İSKENDER, Alper SEYMEN, Atakan AKSOY

Sayfa: 61-73 [PDF](#)

[7. CAST APPLICATION: A CASE STUDY OF CAPECO MULTIPLE TANK EXPLOSION](#)

Müge ENSARİ ÖZAY

Sayfa: 74-83 [PDF](#)

[8. AZ91 MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI](#)

[Fevzi KELEN](#) [Tarık AYDOĞMUŞ](#) [Mehmet GAVGALI](#)

[Sayfa: 84-90](#) [_PDF](#)

[9. EDİRNE İKLİM ŞARTLARINDA ÇEVRE SICAKLIĞI VE RÜZGAR HIZININ POLİKİSTAL FOTOVOLTAİK PANEL ÇIKIŞ GÜCÜNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ](#)

[Dinçer AKAL](#) [Ahmet Erhan AKAN](#)

[Sayfa: 91-102](#) [_PDF](#)

[10. ANAEROBİK ÇAMUR ÇÜRÜTÜCÜLERDE FARKLI KATI MADDE ALIKONMA SÜRELERİNDE UÇUCU YAĞ ASİTLERİ VE ALKALİNİTENİN BİYOGAZ ÜRETİM VERİMİNE ETKİLERİ](#)

[Serdar KOYUNCU](#) [Bilgehan NAS](#)

[Sayfa: 103-109](#) [_PDF](#)

[11. MARMARA BÖLGESİ P DALGA HIZI DEĞİŞİMİ VE KABUK KALINLIĞININ BELİRLENMESİ](#)

[İbrahim Hakan DEMİRSİKAN](#) [Şakir ŞAHİN](#) [Erdinç ÖKSÜM](#)

[Sayfa: 110-125](#) [_PDF](#)

[12. ASFALT BETON KAPLAMALARINDA TUNÇBİLEK UÇUCU KÜLÜNÜN FİLLER OLARAK KULLANILMASININ ARAŞTIRILMASI](#)

[Mohd İsmail TIMORI](#) [Mesut TİGDEMİR](#)

[Sayfa: 126-141](#) [_PDF](#)

[13. AN INVESTIGATION ON EDGE DETECTION OF STRUCTURES AND DEPTH ESTIMATION OF ISPARTA ANGLE REGION \(SOUTHWEST TURKEY\) USING AEROMAGNETIC DATA](#)

[Ezgi ERBEK KIRAN](#)

[Sayfa: 142-151](#) [_PDF](#)

[14. KÜTAHYA KENT MERKEZİNDE HAVA KALİTESİNİN ZAMANSAL VE MEKANSAL DEĞİŞİMİ](#)

[Kaan İŞINKARALAR](#)

[Sayfa: 152-160](#) [_PDF](#)

[15. DEPREM ETKİLERİNİN BETONARME ÇERÇEVELER İLE BAĞ KİRİŞLİ BETONARME PERDELER TARAFINDAN BİRLİKTE KARŞILANDIĞI BİNALARDA BAĞ KİRİŞİ MODELLERİNİN YAPI PERFORMANSINA ETKİSİ](#)

[Ömer ÖZER](#) [Bahadır YÜKSEL](#)

[Sayfa: 161-179](#) [_PDF](#)

[16. Ca²⁺ SALINIMI YARDIMIYLA SİLİS DUMANLI VE UÇUCU KÜLLÜ HARÇLARIN H₂SO₄ DİRENCİNİN İNCELENMESİ](#)

[Paki TURGUT](#) [Kazım TÜRK](#) [Feridun DEMİR](#) [Nuray KARADAŞ](#)

Sayfa: 180-187 [PDF](#)

[17. DEĞİŞTİRİLMİŞ AYRIK HAAR DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İLE YENİ BİR HISTOGRAM EŞİTLEME YÖNTEMİ](#)

[Faruk BULUT](#)

Sayfa: 188-200 [PDF](#)

[18. ÇOK AMAÇLI EVRİMSEL ALGORİTMALAR İLE FİLTRE TASARIMI](#)

[Ahmet ULUSLU](#)

Sayfa: 201-216 [PDF](#)

[19. HAZIR YEMEK SEKTÖRÜNDE BAZI TEMEL GİRDİLERİN TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİ, İZLENEBİLİRLİĞİ VE MEVZUATLA İLİŞKİ KURULARAK SİSTEM GELİŞTİRİLMESİ](#)

[Begüm KELEŞ](#) [Gülден OVA](#)

Sayfa: 217-227 [PDF](#)

[20. AKI VE KAYMA FREKANSI KESTİRİMİ İLE ASENKRON MOTORUN ALGILAYICISIZ SKALER HIZ DENETİMİ](#)

[Mehmet Onur GÜLBAHÇE](#) [Muhammed Emin KARAASLAN](#)

Sayfa: 228-237 [PDF](#)

[21. THE SPATIAL ANALYSIS OF b-VALUES OF THE AREA BETWEEN BODRUM AND FETHIYE DISTRICTS, THE SOUTH-WESTERN ANATOLIA, TURKEY](#)

[Fahriye AKAR](#) [Mehveş Feyza AKKOYUNLU](#) [Funda BİLİM](#)

Sayfa: 238-246 [PDF](#)

[22. ESTIMATION OF THE MAXIMUM BENDING MOMENT OF CANTILEVER SHEET PILE WALLS BY USING MULTIPLE LINEAR REGRESSION ANALYSIS](#)

[Recep AKAN](#)

Sayfa: 247-256 [PDF](#)

[23. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜÇ AKIŞI ANALİZİ VE BİR EĞİTİM ARACININ GELİŞTİRİLMESİ](#)

[İbrahim ŞENGÖR](#) [Mehmet Cenk KAYA](#)

Sayfa: 257-271 [PDF](#)

[24. LAVANTA BİTKİSİ ÖZÜTÜ KULLANILARAK SIN^{H2}@FeNP NANOKOMPOZİTİNİN YEŞİL SENTEZİ İLE SULU ÇÖZELTİDEN METİLEN MAVİSİNİN GİDERİMİ: DENEYSEL TASARIM YAKLAŞIMI](#)

[Yunus PAMUKOĞLU](#) [Bülent KIRKAN](#) [Belgin YOLDAŞ](#)

Sayfa: 272-285 [PDF](#)

Derleme / Review

25. TÜRKÇE METİNDEN KONUŞMA SENTEZLEMeye YÖNELİK YAPILAN ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ

Gamze YILMAZ Mustafa YAĞCI

Sayfa: 286-296 [PDF](#)

26. ŞARJ EDİLEBİLİR PİLLERE GENEL BAKIŞ

Kadir Can SEZER Gültekin BASMACI

Sayfa: 297-309 [PDF](#)

27. TÜRKİYE'DE GIDA MÜHENDİSLİĞİ EĞİTİMİ

Sencer BUZRUL

Sayfa: 310-317 [PDF](#)

28. TÜRKİYE'DE NESNELERİN İNTERNETİ (IOT) ALANINDA YAZILMIŞ YÜKSEK LİSANS TEZLERİNİN İNCELENMESİ-BİR META ANALİZ ÇALIŞMASI

Ayşe ALKAN İsmail KIRBAŞ

Sayfa: 318-327 [PDF](#)

29. ÇEKİŞMELİ ÜRETİCİ AĞLAR VE TRANSFER ÖĞRENİMİ KULLANILARAK GÖĞÜS X-RAY GÖRÜNTÜLERİNDEN COVID-19 TESPİTİ ÜZERİNE BİR DERLEME

Meltem KURT PEHLİVANOĞLU Uğur Kadir ARABACI

Sayfa: 328-340 [PDF](#)

30. AVOKADONUN BİYOAKTİF BİLEŞENLERİ VE SAĞLIK ÜZERİNE ETKİLERİ

Lale GÜMÜŞTEPE Ebru AYDIN Gülcan ÖZKAN

Sayfa: 341-359 [PDF](#)



PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF B₄C REINFORCED AA7075 COMPOSITE METALLIC FOAM

Guzide Meltem LULE SENOZ*, Rabia CINAR DASKESEN

Atatürk University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Erzurum, Turkey

Keywords

*Metallic Foam,
Sponge Replication
Technique,
Metal Matrix Composite,
Al-Zn-Mg Alloy,
Microstructure.*

Abstract

In this study, the production and characterization of open-cell composite metal foam using the replica method, also known as polymer impregnation, was investigated. Composite powders were prepared by alloying in a planetary ball mill for 1 hour using AA7075 aluminum powder and 10% by weight B₄C powder. Characterization and morphology analysis of the composite metal foam produced using the prepared composite powders were performed using XRD and SEM/EDS analyses. As a result of the analyses, it was observed that α -Al, B₄C, C phase as a result of the polyurethane sponge not being completely removed from the structure, and secondary and tertiary phases such as Al₃BC, AlB₂, AlB₁₂C₂ and Al₃B₄₈C₂ resulting from the sintering process were observed in the composite foam metal structure.

B₄C TAKVİYELİ AA7075 KOMPOZİT METAL KÖPÜK ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Anahtar Kelimeler

*Metal Köpük,
Sünger Replikasyon Tekniği,
Metal Matrisli Kompozit,
Al-Zn-Mg Alaşımı,
Mikroyapı.*

Öz

Bu çalışmada replika metodu diğer adıyla polimer emdirme metodu ile açık hücreli kompozit metal köpük üretimi ve karakterizasyonu araştırılmıştır. Kompozit tozlar AA7075 alüminyum tozu ve ağırlıkça %10 B₄C tozu kullanılarak gezegensel tip bilyeli öğütücüde 1 saat alaşımlanarak hazırlanmıştır. Hazırlanan kompozit tozlar kullanılarak üretilen kompozit metal köpüğün karakterizasyonu ve morfoloji incelemesi XRD ve SEM/EDS analizleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, kompozit köpük metal yapısında α -Al, B₄C, poliüretan süngerin yapıdan tam olarak uzaklaşmaması sonucu C fazı ve sinterleme prosesinden kaynaklanan Al₃BC, AlB₂, AlB₁₂C₂ ve Al₃B₄₈C₂ gibi ikincil ve üçüncül fazların oluştuğu gözlemlenmiştir.

Alıntı / Cite

Lule Senoz, G.M., Cinar Daskesen, R., (2022). Production and Characterization of B₄C Reinforced AA7075 Composite Metallic Foam, Journal of Engineering Sciences and Design, 10(1), 1-6.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

G.M. Lüle Şenöz, 0000-0003-0870-1269
R. Çınar Daşkesen, 0000-0002-0822-686X

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	03.06.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	15.09.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	05.11.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Introduction

Recently, with the developing technology, the need for low-weight and high-strength constructions has been increasing in every field (Ashby et al., 2000). Metallic foams are in the group of materials that are in demand due to their lightness and durability in important industrial areas such as the aerospace and especially the automotive sector. Due to the porous internal structure in metallic foam, materials with low density show superior properties such as thermal insulation, sound insulation and vibration damping properties (Çinici, 2004; Güven, 2011). aluminum and its alloys; it is preferred more than other competitive materials due to its high resistance to corrosion, low densities, high thermal and electrical conductivity, ability to increase resistance with precipitation hardening, ease of workability and ease of purchase (Dahil, 2017). Foam metals produced using aluminum can be used in many engineering applications due to their high strength and superior wear properties (Baumeister et al., 1997; Duarte and Banhart, 2000; Tan et al., 2005; Banhart and Seeliger, 2008). Although aluminum is generally

* İlgili yazar / Corresponding author: meltem.lule@atauni.edu.tr, +90-442-231-6039

used in metal foam production, nickel (Gauthier et al., 2004) and especially titanium (Lee et al., 2008; Kashef et al., 2009; Kovtunov et al., 2015) and tantalum (Zardiackas et al., 2001) are used for biomedical applications. The most commonly used foam metal production methods include precision casting (Allen et al., 1959), casting around hollow spheres (Banhart and Seeliger, 2008), metal injection molding, spacer, metal powder rolling, and sintering. The costs of metal foams produced using these methods vary according to the structural complexity of the foam material, its quantity and the area in which it is applied/used. As the structure of the foam material produced progresses from simple shapes to complex shapes, the process becomes more difficult and therefore the cost increases. Another way is to create polymer foams loaded with metallic particles, remove the polymer and combine the particles (Zaman, 2011; Danaci, 2011). The production cost of foam metals produced by using the polymer impregnation method is more economical than other methods and is preferred by manufacturers day by day.

The aim of this study is to investigate the economical production of AA7075-B₄C composite metal foams with low density and durable open cell structure using polymeric impregnation method. Composite powders were prepared by alloying in a planetary ball mill for 1 hour using AA7075 aluminum powder and 10% by weight B₄C powder. Characterization and morphology analysis of the composite metal foam produced using the prepared composite powders were performed using XRD and SEM/EDS analyses.

2. Material and Method

2.1. Material

The matrix material used in the experiments was commercially graded air gas atomized AA7075 powders (Purity: 99,9%) with average particle size of 55 μm . The chemical composition of AA7075 powder was given in Table 1. B₄C particles (Purity: 99.5%) with an average particle size of 4 μm was added as the reinforcement.

Table 1. Chemical Composition of AA7075

Components	Zn	Mg	Fe	Si	Zr	Mn	Cr	Cu	Al
Amount (wt%)	5,46	2,75	0,12	0,17	0,03	< 0,01	0,24	1,57	Balanced

2.2. Production of Composite Material

The calculated amount of AA7075 aluminum alloy powder and 10% by weight of B₄C powder were milled in a Retsch PM 400/2 planetary ball mill operating at 250 rpm for 60 minutes in order to prepare a homogenous mix. AA7075 aluminum alloy powder and B₄C powder were loaded into a 125 ml WC grinding jar with 10 mm diameter WC balls at a powder-ball ratio of 1:10. The milling procedure was carried out at a grinding speed of 250 rpm using 1 wt% fine zinc stearate powder as a process control agent (PCA) to minimize the cold welding between powder particles and thereby prevent agglomeration (Figure 1). To prevent overheating, the ball mill was stopped every 20 minutes and a break time of 10 minutes was given.



Figure 1. Schematic of The Mechanical Alloying Process (A) Retsch PM400/2 Ball Planetary Mill, (B) 125 ml WC Grinding Jar With 10 Mm Diameter WC Balls, (C) Addition of 1% Zinc Stearate

2.3. Production of Open-Cell Metal Foams by Sponge Replication Technique

Replica method, also known as polymer impregnation method, was used for metal sponge production. The template used for this method is a 25 ppi (por/inch) polyurethane sponge (Figure 2). The density of the slurry mixture prepared with composite powders, polyvinyl alcohol (PVA) dissolved in water for 1 hour at 95°C used as binder, 1% polycarboxylic acid used as anti-caking dispersant, and distilled water, was determined according to previous literature studies and was prepared at 60% solid rate. The polyurethane sponges immersed in the prepared slurry and were kept in the slurry for 5 minutes, then removed from the slurry and kept on the platform for 2 hours at room temperature in order to remove the excess slurry from the surface. Then the samples were placed in a drying oven at 100°C for 24 hours to remove surface water. Binder and polyurethane sponge combustion were carried out in air for 3 hours at 250°C and 3 hours at 500°C in an air circulation oven, respectively. The sintering process, which is the final heat treatment, was carried out in a conventional tube furnace at 650°C for 3 hours under argon gas atmosphere.

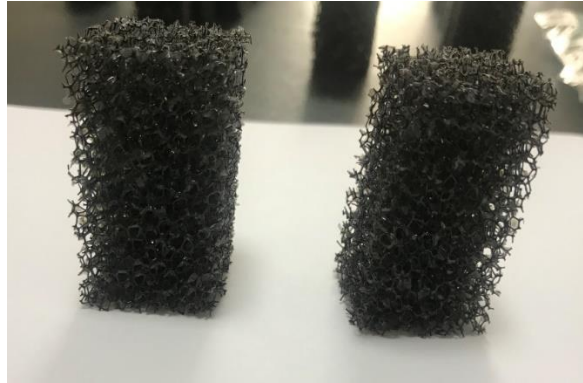


Figure 2. 25ppi Polyurethane Sponges (2.5cm x 2.5cm x 5cm)

The macrostructure images of the foam metals produced are shown in Figure 3. As can be seen in the figure, it has been observed that the produced aluminum foams have an open-cell foam structure, and their macro pores are in a round shape and in connection with each other.

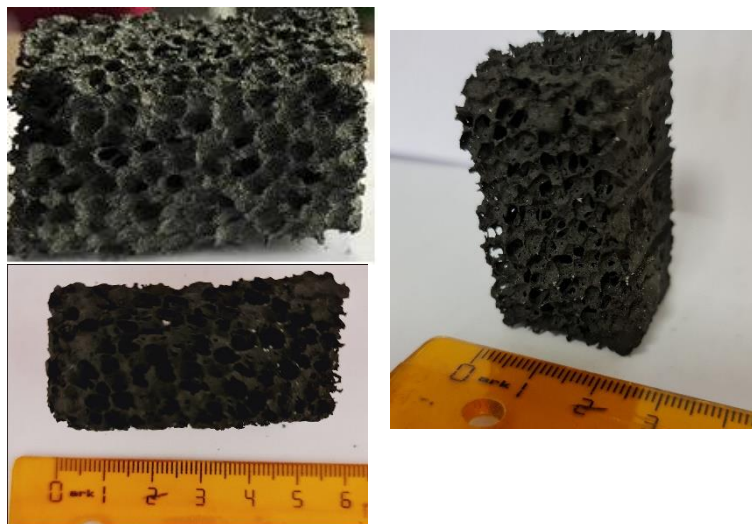


Figure 3. Macro Images of Produced Aluminum Foams

2.4. Characterization

XRD analysis was carried out in order to determine the existing phases before mechanical alloying, to examine the intermediate phases and their structures that may occur after alloying and during the production of composite metal foam. XRD measurements were carried out by using Rigaku-2200 D/Max X-ray powder diffractometer with Cu K α radiation. The generator set was 45 kV, 40 mA. The diffraction patterns were collected at room temperature by step scanning in the range of $10 \leq 2\theta \leq 90^\circ$ with a scan rate of $0.6-2^\circ \text{ min}^{-1}$. PANalytical XPert-High Score Plus software was used for analysis of XRD spectra. The morphology of starting powders and composite metal foam were investigated by using scanning electron microscopy (SEM) equipped with JEOL JSM-6060 instrument. In

order to take images samples vacuum impregnated in epoxy resin were cut with a Struers Accutom-5 Linear Precision Saw at a feed rate of 0.05 mm / s. The surface of the samples was mechanically ground to 2000 grit SiC paper, then polished using 0.05 μm silica colloidal with 1 μm diamond paste. Lastly, Vickers hardness measurement was made on the foam samples that were sanded and polished after cold mounting. Hardness measurements using a 25g load (HV0.025) were obtained by taking the mean of at least five individual readings.

3. Experimental Results

3.1. XRD Analyses

The enlarged XRD patterns of as-received AA7075 and B_4C powders were illustrated in Figure 4. The XRD patterns of the AA7075 aluminum alloy showed characteristic five highest intensity peaks corresponding to the reflection plane of α (Al) at $\approx 38.48^\circ$ (111), $\approx 44.72^\circ$ (200), $\approx 65.10^\circ$ (220), $\approx 78.23^\circ$ (311) and $\approx 82.45^\circ$ (222) while B_4C particles showed three intensity peaks at $\approx 23.5^\circ$ (012), $\approx 34.5^\circ$ (104), and $\approx 37.82^\circ$ (021).

The XRD graph of the composite metal foam prepared using AA7075-10% B_4C composite powder, which is alloyed for 1 hour, was shown in Figure 5. As a result of the analysis, apart from the 5 basic α -Al peaks belonging to the AA7075 phase and the peaks belonging to the reinforcement element; peaks belonging to the C phase as a result of the polyurethane sponge not being completely removed from the structure and secondary and tertiary phases such as Al_3BC , AlB_2 , $\text{AlB}_{12}\text{C}_2$ and $\text{Al}_3\text{B}_{48}\text{C}_2$ resulting from the sintering process were determined using the PANalytical XPert-High Score Plus software.

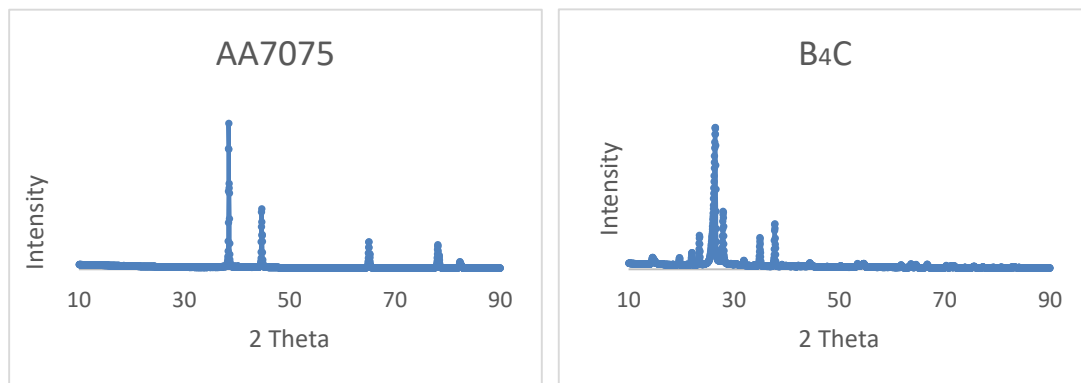


Figure 4. XRD Analysis of As-Received AA7075 and B_4C Powder

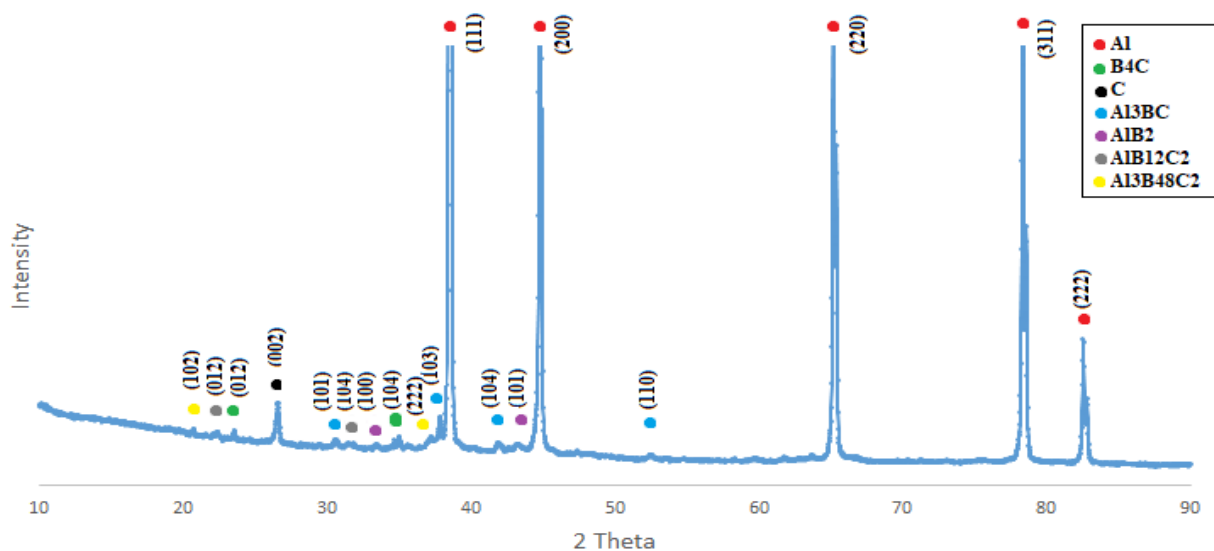


Figure 5. XRD Analysis of AA7075-10% B_4C Foam Metal Alloying For 1 Hour

3.2. SEM/EDS (Scanning Electron Microscopy) Analysis

SEM images of as-received AA7075 and B₄C powders are given in Figure 6. As seen in Figure 1, AA7075 particles have a spherical morphology of 55 µm particle size, while B₄C particles have an irregular morphology with sharp corners of 4 µm particle size.

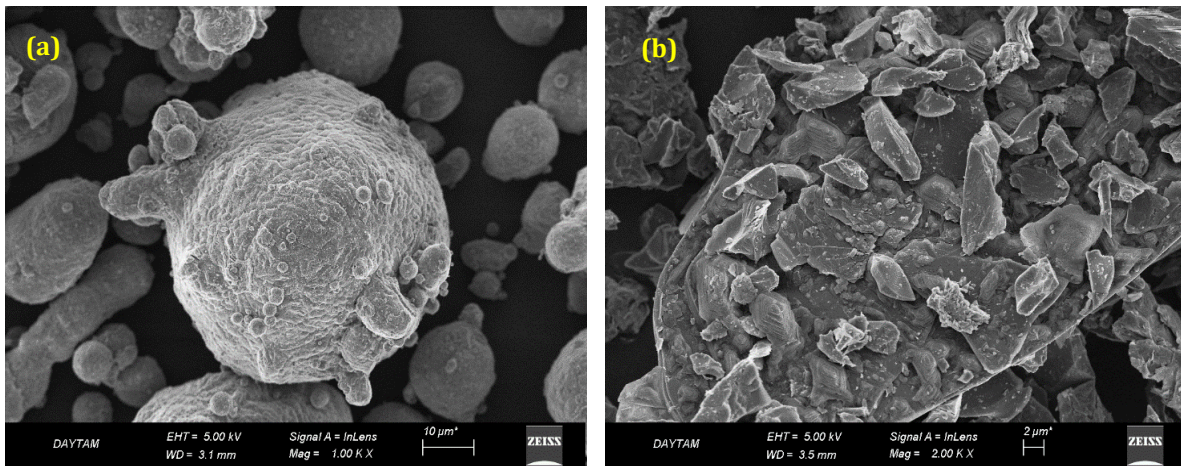


Figure 6. SEM Images of As-Received Powders (A: AA7075, B: B₄C)

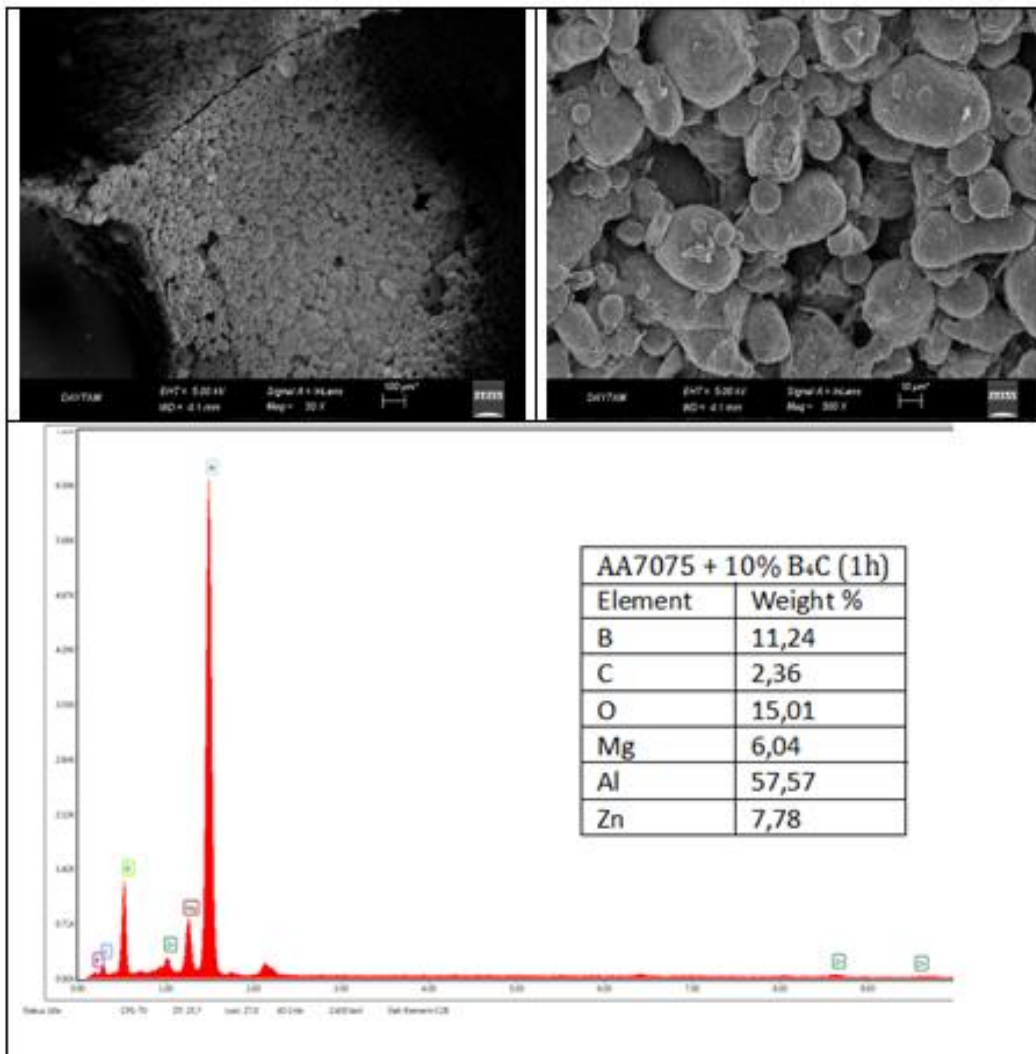


Figure 7. SEM/EDS Analysis of AA7075-10% B₄C Foam Metal Alloying For 1 Hour

When the macro images are examined after sintering, it is observed that the macro pores are in a round structure and form an open-cell structure in connection with each other, retreat and shrinkage occur in the foam model due to the polyurethane sponge material moving away from the structure.

SEM/EDS analysis was carried out in order to examine the effects of the sintering process on the structure, macro and micro pores in the composite metal foam structure and the corners and edges of the metal foam cell walls. SEM images are given in two different forms as macro and micro (Figure 7). The foam metal cell walls and corners are clearly visible in the macro images. Due to insufficient sintering time, small, rounded geometry and localized grains were observed on the cell walls. It is thought that this problem will be minimized in longer sintering times. EDS analysis was performed on the surfaces of metal foam materials to determine if there was any reaction or contamination during the composite metal foam production and sintering process. In the results of EDS analysis, apart from Al, Zn and Mg elements belonging to AA7075 alloy and B and C elements belonging to reinforcement element, O element was observed. This is due to the affinity of the aluminum material for oxygen.

4. Result and Discussion

In this study, the production and characterization of open-cell composite metal foam using the replica method, also known as polymer impregnation, was investigated. Despite the oxide impurities in the case of aluminum, it has been shown that it is possible to produce AA7075-B₄C composite foam metal. The microhardness value (24 ± 3 Hv) of the produced open-cell aluminum foam material is close to the hardness value (30.5 Hv) of the closed-cell aluminum foams produced by Alporas; however, lower from that of the closed-cell aluminum foams produced by Alulight Company (54.8 Hv). It is thought that sintering for 3 hours at 650C in an argon gas atmosphere is not sufficient, and more economical and durable cellular structures can be obtained by prolonging the sintering time or by sintering in different inert gas mixture atmospheres that can prevent oxidation.

Acknowledgement

This work was supported by the Atatürk University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: FBA-2020-8469.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Allen, B. C., Mote, M. W., and Sabroff, A. M., 1959. Method of making foamed metal USA. Patent 3087807A.
- Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., and Wadley, H. N. G. . 2000. Metal Foams: A Design Guide Butterworth-Heinemann: USA.
- Banhart, J., and Seeliger, H. W. 2008. Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications, *Advanced Engineering Materials*, 10, 793-802.
- Baumeister, J., Banhart, J., and Weber, M. 1997. Aluminium foams for transport industry, *Materials & Design*, 18, 217-20.
- Çinici, H., 2004. Toz metalurjisi yöntemi ile alüminyum esaslı metalik köpük üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Dahil, L. 2017. Alüminyum Köpük Malzemenin Dinamik Davranışlarının İncelenmesi Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 17: 352-56.
- Danacı, E., 2011. Ti-6Al-4v Alaşımı ile Açık Hücreli Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Duarte, I., and Banhart, J. 2000. A study of aluminium foam formation—kinetics and microstructure, *Acta Materialia*, 48: 2349-62.
- Gauthier, Maxime, Lefebvre, Louis-Philippe, Thomas, Yannig, and Bureau, Martin N. 2004. Production of Metallic Foams Having Open Porosity Using a Powder Metallurgy Approach, *Materials and Manufacturing Processes*, 19, 793-811.
- Güven, Ş. Y. 2011. Toz Metalurjisi ve Metalik Köpükler, *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 1: 22-28.
- Kashef, Sadaf, Lin, Jianguo, Hodgson, Peter D., and Yan, Wenyi. 2009. 'Mechanical Properties of Titanium Foam for Biomedical Applications.' in, *Engineering Plasticity and Its Applications From Nanoscale to Macroscale WORLD SCIENTIFIC*.
- Kovtunov, A. I., Khokhlov, Yu Yu, and Myamin, S. V. 2015. Layered Composite Material Formation Technology for the Titanium-Foam Aluminum System, *Metallurgist*, 59, 339-41.
- Lee, Min Ha, Kim, Ki Buem, Han, Jun Hee, Eckert, Jürgen, and Sordet, Daniel J. 2008. High strength porous Ti-6Al-4V foams synthesized by solid state powder processing, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41, 105404.
- Tan, P. J., Reid, S. R., Harrigan, J. J., Zou, Z., and Li, S. 2005. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part I—experimental data and observations, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53, 2174-205.
- Zaman, E., 2011. Açık Hücreli Al Köpük Üretimi Ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zardiackas, L., Parsell, D., Dillon, L., Mitchell, D., Nunnery, L. A., and Poggie, Robert. 2001. Structure, metallurgy, and mechanical properties of a porous tantalum foam, *Journal of biomedical materials research*, 58, 180-7.



GEREDE-KAVACIK BÖLGESİ BAZALTLARININ ENDÜSTRİYEL KULLANIMI AÇISINDAN UYGUNLUĞUNUN BELİRLENMESİ

Taşkın Deniz YILDIZ^{1*}, Ali Haydar GÜLTEKİN², Şenel ÖZDAMAR²

¹ Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Adana.

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Agrega, Balast, Bazalt, Fizikomekanik, Jeokimya, Kaya Yünü.</i>	<p>Bu çalışmada, Ankara-Bolu arasında, Galatya Volkanik Bölgesi olarak adlandırılan volkanik kayaların bir parçasını oluşturan Bolu-Gerede Kavacık sahası baz alınarak bölge bazaltlarının endüstriyel kullanım alanlarına uygunluğu araştırılmıştır. Laboratuvar çalışmalarında, arazi çalışmaları kapsamında uygun görülen lokasyonlardan alınan numuneler üzerinde iki aşamalı çalışma yapılmıştır. İlk aşamada örneklerin mineralojik ve petrografik analizleri yapılmıştır. Numunelerin makroskopik özelliklerinden, renk, yapı ve doku, ayrışma, sertlik, ayrışma özelliği, cila kabulü ve asitte çözünürlük özellikleri belirlenmiştir. Mikroskopik özelliklerinden mineral içerikleri, yapı, doku, granüler dağılımları belirlenmiştir. Bu analiz sonuçları jeokimyasal analiz sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmiştir. İkinci aşamadaysa numunelerin fizikomekanik özelliklerinden yoğunluk, kuru birim ağırlıkları, ağırlıkça-hacimce su emme, gözeneklilik, dona dayanıklılık, metilen mavisi, tek eksenli basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Çıkan sonuçlara göre Gerede-Kavacık bazaltları belli şartlarda, doğal taş haliyle deniz dolgusunda (bloktaş olarak), anroşman inşaatında ve benzeri işlerde, kaplama taşı ve doğal yapıtaşı olarak, ya da taban döşemesinde, dış cephe kaplamasında, ve kaya yünü olarak kullanıma uygundur.</p>

DETERMINATION OF SUITABILITY FOR INDUSTRIAL USE OF BASALTS IN THE GEREDE-KAVACIK REGION

Keywords	Abstract
<i>Aggregate, Ballast, Basalt, Geochemistry, Physicomechanics, Rock Wool.</i>	<p>In this study, based on Bolu-Gerede Kavacık site which forms a part of volcanics called Galatia Volcanic Complex between Ankara-Bolu, the suitability of basalts in the region to the industrial use areas was investigated. In the laboratory studies, a two-stage study was conducted on samples taken from locations considered appropriate in the scope of field studies. In the first stage, mineralogical and petrographic analyses of the samples were conducted. From the macroscopic properties of the samples, color, structure and texture, weathering, hardness, weathering property, polish acceptance and acid solubility were determined. Mineral contents, structure and texture, and granulations were determined from the microscopic characteristics. The results of this analysis were evaluated together with geochemical analysis results. In the second stage, density, dry unit weights, water absorption by weight-volume, porosity, frost resistance, methylene blue, and uniaxial compressive strength tests were conducted from the physico-mechanical characteristics of the samples. According to the results, Gerede-Kavacık basalts are suitable for use on a certain scale as block-stone in sea embankment with its natural stone state, as facing stone and natural building stones in riprap construction and so forth, or in base slab, in siding, and as rock wool.</p>

Alıntı / Cite

Yıldız, T.D., Gültekin, A.H., Özdamar, Ş., (2022). Gerede-Kavacık Bazaltlarının Endüstriyel Kullanım Alanlarına Uygunluğu, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 7-27.

* İlgili yazar / Corresponding author: tdyildiz@atu.edu.tr

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
T.D. Yıldız, 0000-0003-4043-2257	Başvuru Tarihi / Submission Date	27.05.2021
A.H. Gültekin, 0000-0002-4423-9385	Revizyon Tarihi / Revision Date	25.10.2021
Ş. Özdamar, 0000-0002-4706-8585	Kabul Tarihi / Accepted Date	08.11.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Yeraltı zenginliklerinin ortaya çıkarılmasının ulusal ekonomilere ve toplumsal refaha yapabileceği katkısı ve önemi her geçen gün artmaktadır. Bu katkı, madenlerin bilimsel anlamda anlaşılması ile doğrudan ilişkilidir. Dünyada hacimsel olarak en çok doğaltaş üretimi yapılmaktadır. Doğaltaşlar içerisinde de en çok üretilenlerinden biri bazaltlardır.

Teknolojideki gelişmelerin etkisiyle bazaltların önemi artmış, bir endüstriyel hammadde olarak bazaltın fizikomekanik özelliklerinin belirlenmesi sayesinde, tarihsel süreç içerisinde kullanım alanlarının araştırılmasına, bir yapı taşı olarak günümüz uygulamalarında geçirdiği süreçlerin incelenerek yeni üretim çalışmalarının gerçekleştirilmesine olanak sağlanmıştır (Halifeoğlu ve Dalkılıç, 2002). Yapılarda kullanılan taş malzemelerde, mukavemet, atmosfer etkilerine dayanıklılık ve estetik gibi özellikler aranır. Bazik kayaç grubu içinde yer alan bazaltlar, diğer karbonat grubu mermerlere kıyasla daha serttir, aşınma ve asite karşı dayanımlıdır. Kesilebilir olması ve iyi cila kabul eden, koyu renkli albenisi gibi nitelikleriyle genişçe kullanım alanlarına sahiptir (Uz, 1990). Bazaltların endüstriyel kullanım alanları şöyledir:

- (Siyah granit) Mermer, küp taş ve parke, dekoratif kaplama (Uz vd., 2001; Yaşar ve Erdoğan, 2001; Yüzer vd., 2006; Kulaksız, 2007; Yüzer, 2008; Koçak, 2011),
- Balast malzemesi olarak demiryolu hatlarının yapımında (Koralay vd, 2014),
- Kırma taş (agrega) olarak betonda (Uz, 1999; Çağlayan vd., 1999; Öztürk vd., 2003; Karadağ, 2008; Yıldırım vd., 2008; Koçak, 2011; Kılıç vd., 2015; Kahraman ve Kılıç, 2016; Taşdemir, 2016; TS EN 206, 2014),
- Binalarda yapı taşı (Korkanç ve Tuğrul, 2001),
- Otoyollarda asfalt malzemesi (Aksoy, 1999; Gökalp vd., 2018),
- Bazaltik cürufların (gözenekli bazaltların) kaba ve ince sıvada kullanımları (Kulaksız, 2017),
- Çatılarda ısı izolasyonunda doğal halde bazaltik cüruflar (Kulaksız, 2017),
- Hafif beton elemanlarının üretiminde (Kulaksız, 2017),
- Kaya yünü üretiminde (Kuşoğlu vd., 2012),
- Çimento sektöründe altere bazaltların tras olarak kullanımları (Kulaksız, 2017).

Bazalt yeryüzünde sıklıkla rastlanan volkanik kayaçlardan birisidir (Erkan, 2013). Sağlam, estetik, alternatiflerde üstün özellikleri bazaltların ilk tercih edilen kayaçlardan biri olmasını sağlamıştır. Bazaltlar, sert, dayanıklı, bünyesinde serbest silis içermemesi ve kir götüren özelliklerine dayalı olarak doğal taş amaçlı, 2(b) maden grubu kapsamında hakiki mermer ile diğer doğal taşların kullanıldığı alanlarda değerlendirilebilmektedir. (Bazaltlar özelliklerine göre 2(a) ve 2(b) maden grubunda yer alır (3213 sayılı Maden Kanunu, m.2; Yıldız, 2019). Bazaltların 2(b) grubu kapsamında değerlendirilmesinde öne çıkan bazı özellikler için bakınız (Akbulut vd., 2016)). 2(b) grubu kapsamında doğal taş olarak, binaların iç ve dış mekanlarında, meydan, yol ve patika döşemelerinde kullanılabilir. Bazaltın doğal taş olarak kullanılabilmesinde en önemli şart, akma yapısına dayalı olarak blok verebilmesidir. Çok kırıklı, fay zonlarında bulunan bazaltlar daha çok agrega/mıçır için uygundur (Akbulut vd., 2016). Bazaltların (kaya yünü gibi) bir endüstriyel hammadde veya (mermer, agrega gibi) yapı malzemesi olarak da kullanım alanları geniştir.

Bazalt, kaya yünü üretiminde kullanılan kayaçların en önemlisidir. Bazalt yünü, bazalt kayacının ~1600°C'de ergitilmesi suretiyle katkı maddeleriyle birleştirilerek, veya doğrudan katkı maddesi olmaksızın işleme tabi tutularak elde edilir. Bazalt yünü, mükemmel ısı ve yüksek elastisite dayanımıyla, ses yalıtma özelliğiyle, asitlere ve alkalilere dayanımıyla, düşük maliyetli ve sağlıklı olması sayesinde birçok alanda kullanılmaktadır (Patnaik, 2009). Bazaltların, yapısal yönden aşınmalara, iklim özelliklerine ve zamana karşı son derece dayanıklı olması; iç

ve dış mekanların cephe ve zemin kaplamalarında, mimari projelerde oldukça fazla kullanılmasını sağlamıştır. Cam seramik ve mineral tabanlı yalıtım sistemlerinde, ev ısıtmalarında, şehirlerarası yollarda, kaldırımlarda, tretuarlarda, bahçe dekorasyonlarında ve mimari yapıların hemen her alanında ekonomik öneme sahiptir. Bunların yanı sıra bazalttan elde edilen kaya yününün, gemi ve denizlerde inşa edilen yapıların duvar yalıtımında ve döşeme işlerinde, kazan dairelerinde, klima, baca malzemeleri ve kanallarında, tank depolarında, yangın çıkış kapılarında, duvar modüllerinde, ve tavan izolasyonlarında kullanılıyor olması bazaltların ekonomiklik alanını genişletmektedir (Mercan Madencilik, 2018). Ayrıca kaya yününden elde edilen yapı malzemeleri son zamanlarda kirşilerde demir yerine kullanılmakta ve oldukça iyi sonuçlar elde edilmektedir (Kuşoğlu vd., 2012). Yüksek dayanımı, hafifliği, manyetik olmaması, korozyonsuz olması ve iyi metal mukavemeti göstermesi en önemli özelliklerindedir (Patnaik, 2009). Türkiye’de bazalt yayılımı çok fazla olmasına karşın halen Gebze, Ankara (Sincan ve Polatlı), Kayseri ve Eskişehir’deki fabrikalarda kaya yünü üretimi yapılmaktadır (Kuşoğlu vd., 2012). Ayrıca Sakarya’da da bir kaya yünü fabrikası açılmıştır.

Fizikomekanik olarak bazalt özellikleri göz önüne alındığında, kırmataş olarak bazaltlar değişik oranlarda agrega olarak kullanılarak beton bileşimlerine de katılabilmektedir (Mercan Madencilik, 2018). Bazalt agregaları, dünya genelinde demiryolu bazaltından ziyade yüksek mukavemetli beton üretimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Karadağ, 2008; Yıldırım vd., 2008). Bu konudaki araştırmalar, bazaltların dayanımlı olmaları sebebiyle betonun kalitesini ve dayanımını yükselttiğini ortaya çıkarmıştır (Tasong vd., 1998; Özturan ve Çeçen, 1997). Ancak ülkemizde ise bazaltlar, hem agrega, hem de yapı ve kaplama malzemesi olarak halen yeterli düzeyde kullanıma sahip değildir (Korkanç ve Tuğrul, 2003). Halbuki bazaltların kırmataş olarak binalarda ve yol yapılarında kullanılmasının kaliteyi ve dayanımı arttırdığı, örneğin basınç dayanımını 200-250 MPa yükselttiği yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır (Uz, 1999). Kırmataş, özellikle çimento fabrikalarının ana hammaddesi olarak, ayrıca kırma-eleme işlemleri sonrasında farklı boyutlarda mıcır şeklinde -özellikle inşaat sektörüne uygun olmak kaydıyla- farklı sektörlerin kullanımı için hazırlanmaktadır. Kırmataş, yol yapımı, asfalt, hazır beton, balast, dolgu, dış siva gibi işlerde kullanılmaktadır (Aksoy, 1999; Gökalp vd., 2016; Uz ve Gökalp, 2017; Gökalp ve Uz, 2020). Spilitik bazalt diye adlandırılan bazalt, yol gövde dolgusu ve stabilize yol yapımı gibi alanlarda değerlendirilebilmektedir (Akbulut vd., 2016).

Bazaltların ince taneli sık dokulu olanları pratik olarak bozuşmaya karşı hava ve su geçirmez “sağlam kaya” olarak adlandırılmaktadır. Aslında yol malzemesi ve harç için kalite standartlarına uygundur. Bazalt, kuvarşın yokluğuna ya da çok az bulunmasına karşın çok sert bir kayadır. Bazaltın, kumtaşı ve granit benzeri kayalara kıyasla makinalarda aşındırıcılığı düşük düzeydedir. Diğer agregalara kıyasla daha dayanıklıdır ve dirençlidir. İzolasyonda süreklilik ve kalıcılık özelliğine sahiptir (Keskin ve Kılıç, 2003; Kulaksız, 2017). Bazaltın son derece sert bir malzeme olması, sertliğinin ve kayganlaşmayan yüzeyinin olması sayesinde dış mekanlar için son derece kullanışlı bir malzeme olarak bazaltın bordür ve kaldırım taşı gibi malzemelerin yapımında kullanılmasını sağlamıştır. Ayrıca bu özellikleri, araç yollarında da kullanılmasına olanak sağlamıştır. Çok yüksek dayanımı sayesinde bazalt kalabalık caddelerin kaldırımları için ve hatta otoyollarda kaplandıktan sonra yıllar boyu tekrar bakım gerektirmeden kullanılabilir (Kaygısız, 2010). Homojen yapısı sayesinde bazalt, düzgün kırılma yüzeyleri vermesi yönüyle yapıtaşları açısından bilhassa yaya yollarının döşenmesinde zar taşı olarak üretiminde aranılan bir kayadır (DPT, 2001). Bazaltların bir diğer özelliği ise, gazların çıkış yaptığı düşey eksenli boyunca bir kırılma kolaylığı kazanmalarıdır. Delikler bulunmuş olsun ya da olmasın, yayılma yüzeyinin dikine doğru bazalt bloğuna çekiç ile vurulduğu zaman, gazın çıktığı eksenli boyunca bazaltın düz yüzey ile parçalandığı görülecektir. Bu özelliği dikkate alınarak bazaltlardan parke üretiminde oldukça yararlanılmaktadır (Önem, 1997).

Bazalt yataklarının özelliklerinin belirlenerek hangi alanlarda kullanımının uygun olduğunun saptanması gerekmektedir (Deniz vd., 2017). Türkiye’de özellikle İç Anadolu Bölgesi’nde bazalt talebinde ve üretiminde büyük bir artış gözlenmektedir (Mercan Madencilik, 2018). Artan bu talep de dikkate alınarak bölgede yeni bazalt sahalarının, bazaltların endüstriyel kullanım türlerine göre uygunluklarının tespiti önem arz etmektedir. Galatya Volkanik Bölgesi’nin (GVB) endüstriyel hammaddeler yönüyle incelendiği çalışmalar belirgin şekilde ön plana çıkmaktadır. (GVB içinde yer alıp almadığına bakılmaksızın, bazaltların ve volkanik kökenli kayaların ekonomik önemlerini göstermesi dikkate alınarak, bu konuda dikkat çeken bazı literatür çalışmaları için bakınız (Acar vd., 2004; Aral, 2004; Atasoy, 2003; Çelikaş vd., 2017; Deniz ve Kadioğlu, 2012; Deniz vd., 2017; Kaygısız, 2010; Keskin ve Kılıç, 2003; Kibici vd., 2012; Koçak, 2011; Koralay vd., 2014; Korkanç ve Tuğrul, 2001; 2006; 2017; Kulaksız, 2007; 2017; Kulaksız vd., 2006; Toygar Sağın ve Karaoğlu, 2018; Uz, 1999; Uz vd., 2001)). Bu durum, Bolu-Gerede Kavacık Köyü ve civarı olarak belirlenen inceleme alanının ilçe merkezlerine kısmen yakın uzaklıkta bulunması dikkate alınarak, bölgede bolca bulunan bazaltların endüstriyel kullanım alanlarına göre asgari kalite ölçütlerinin araştırılması ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır.

Türkiye’nin ana tektonik zonlarından Sakarya zonu içinde kalan GVB, Bolu-Ilgaz-Ayaş üçgeni arasında kabaca 15000 km²’lik bir alanda yayılım gösterir. Bölgede volkanosedimenterlerle farklı geçişlerde izlenen bazalt, trakibazalt, trakiandezit, trakit, andezit ve dasittik türde alkali ve kalkalkali karakter gösteren kayalar başlıca

volkanik kayalardır. Bazaltların son yıllarda balast malzemesi ve kaya yünü olarak kullanımının artış göstermesi, kaplama taşı, dış cephe kaplamaları vb. alanlarda bazalt ihtiyacının giderek artması, çalışma alanındaki bazalt bileşimli kayaların bu özellikleri taşıyıp taşımadığını merak ettirmektedir.

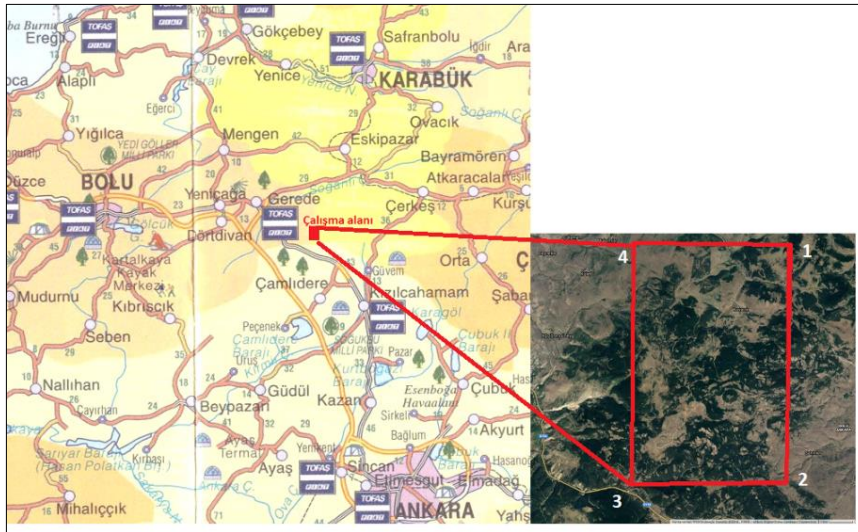
Daha önceden yapılan çalışmalardan Ankara çevresindeki bazaltların dayanımlarının ve sertliklerinin diğer kayalara oranla daha yüksek olması dikkate alınarak taban döşemesinde ve kaplama taşı olarak kullanılabilirliğinin TS standartları açısından uygun olduğunun (Çelikleş vd., 2017) ortaya çıkması, Ankara sınırına çok yakın olan Gerede-Kavacık bazaltlarının niteliklerinin nasıl olduğu sorusunu akıllara getirmektedir. GVB Kavacık volkanik kayaları özgün nitelikleri olan bir bölgedir. Çalışma sahası olarak belirlenen alandaki mineralojik-petrografik-jeokimya çalışmalarının farkı bilim dallarıyla ilişkili olarak ele alınacak olması, fizikomekanik çalışmalar yönüyle disiplinler arası işbirliği yönünün bulunması bu çalışmanın özgünlüğünü arttırmaktadır.

Proje çalışması, bilinen kuram ve yöntemlerin bir sahaya uygulanmasıdır. Bu kuram ve yöntemlerin uygulanması ile ortaya çıkarılacak yeni veriler, jeoloji ve madencilik literatüründe benzer çalışmaların yapılmasını teşvik edecek ve rasyonel sonuçlandırmasına belirgin katkı sağlayacaktır. Mineralojik-petrografik ve jeokimya dallarıyla desteklenen çalışma, Kavacık ve civarında bulunan bazaltların fizikomekanik özellikleri dikkate alınarak endüstriyel kullanım alanlarının görülmesini sağlayacak, ileride yapılabilecek olası madencilik fizibilite çalışmalarına yardımcı olacaktır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bolu-Gerede Kavacık Köyü ve civarı inceleme alanında; mevcut mostra ve alterasyon zonlarının yayılımı, geometrisi, yerleşim şekli, mineral içerikleri, mevcut kayalarda mineralojik ve kimyasal değişimlerin belirlenmesi, bazaltların fizikomekanik özelliklerinin belirlenmesi, ve tüm bu test sonuçlarından yararlanılarak bazaltların endüstriyel kullanım alanlarından hangilerine uygun olduğuna karar verilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda çalışma arazi ve laboratuvar çalışmaları olmak üzere iki safhada gerçekleştirilmiştir:

Arazi çalışmaları, örnek alımı ve haritalama: Arazi çalışması süreci bu proje çalışmasının en önemli ayağını oluşturmuştur. Arazi çalışmaları, yoğunluklu olarak 2018 yılı yaz döneminde, veri uyumluluğu ve muhtemel son kontrol örneklerin alınmasına yönelik olarak da 2019 yılı yaz döneminde olmak üzere iki farklı dönemde yapılmıştır. Çalışma alanı yer bulduru ve uydu görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir. Kavacık Köyü ve civarındaki 78 km²'lik bir alanı kaplayan çalışma alanı Bolu'nun Gerede ilçesinin güneydoğusunda yer alır. Ankara'nın Kızılcahamam ve Çamlıdere, Bolu'nun Yeniçağa ve Dörtdivan, Çankırı'nın Çerkeş ilçelerine yakındır (Şekil 1). [Çalışma sahası koordinatları: 1) Y=448500, X=4511000; 2) Y=455000, X=4499000; 3) Y=455000, X=4499000; 4) Y=448500, X=4511000]. Şekil 1'in sağındaki görüntü "(Google Map, 2018)"den alınmıştır.



Şekil 1. Çalışma Sahasının Yer Bulduru Haritası (Location Map of The Study Area)

Mineralojik-petrografik çalışmalar: Çalışma sahasındaki birimleri temsil edecek özellikteki kayalardan petrografik ve kimyasal analiz amaçlı örnekler alınmıştır. Bu amaçla volkanik kayalar yeterli sayıda örneklenmiş, ayrıca litolojinin değiştiği noktalardan da ilave örnekler alınmıştır. Bazaltlardan, teknolojik özelliklerinin belirlenmesine uygun boyutlarda örnekleme yapılmıştır. Örneklerin makroskopik incelemeleri, ince kesitleri alınarak polarizan mikroskopta mineralojik ve petrografik analizleri yapılmıştır (İnce kesitler İTÜ Jeoloji

Mühendisliği Bölümü'nün "Taş Kesme ve Örnek Hazırlama Laboratuvarı"nda hazırlanmıştır). Numunelerin makroskopik özelliklerinden renk, yapı ve doku, ayrışma, sertlik, ayrışma özelliği, cila kabulü ve asitte çözünürlülük özellikleri belirlenmiştir. Mikroskopik özelliklerinden ise mineral içerikleri, yapı, doku, ve granüler dağılımları belirlenmiştir. Bu çalışma ile dar anlamda sahada yayılım gösteren kayalar adlandırılmıştır. Arazi çalışmaları sürecinde mevcut birimler, özellikle de volkanik kayalar örneklenmiş, volkanik kayaları temsil eden kayalardan alınan örneklerin modal bileşimleri gösterilmiştir. Benzer şekilde alterasyon kuşakları ayrıntılı olarak örneklenmiş, mineralojik olarak incelenmiştir. Alterasyon kuşaklarında örnekleme belirli profiller boyunca sistematik olarak yapılmış, böylece mineralojik değişimler belirlenmeye çalışılmıştır.

Kimyasal analiz için çalışmalar: Çalışma alanındaki kayaç ve alterasyon zonlarından sistematik alınan örnekler, mineralojik ve petrografik incelemelerini takiben kimyasal analiz için hazırlanmıştır. Seçilen numunelerde ana, iz ve nadir toprak element analizleri yapılmıştır. Gerekli sayıda örnek, İTÜ Maden Fakültesi içerisindeki Örnek Hazırlama Laboratuvarlarında öğütülerek farklı analiz şirketlerinin laboratuvarlarına gönderilmiştir.

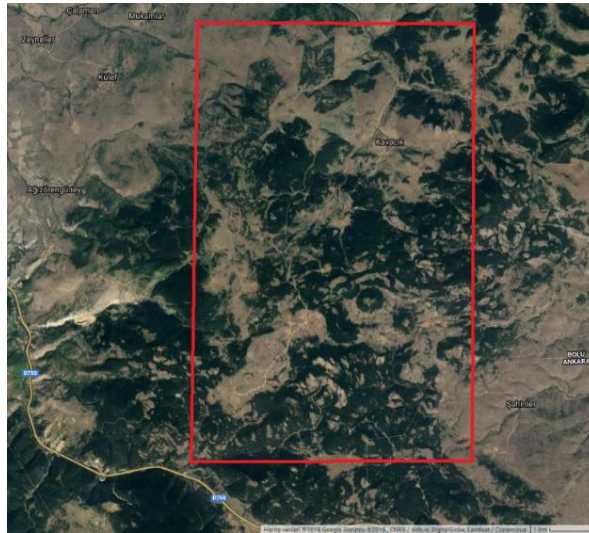
Fizikomekanik test çalışmaları: Çalışma alanında yaygın gözlenen volkanik kayalardan bazaltların teknolojik özelliklerini belirlemek amacıyla alınan blok örnekler kullanılmıştır. Bu amaçla sahadan 10 cm x 10 cm x 10 cm boyutlu, taze kayayı temsil eden örnekler alınmıştır. Örneklerin mekanik testleri İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nün Zemin Mekaniği Laboratuvarı'ndaki cihazlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda "Gölet Bölgesi" ve "Kavacık Batı Bölgesi" olarak belirlenen 2 adet alt bölgede bazaltların fiziko mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Sonuçların değerlendirilmesi: Arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda edinilen bütün veriler ve bilgiler birlikte değerlendirilerek yorumlanmıştır. Çalışma kapsamında proje, aslında geniş bir alana yayılım gösteren GVB'ye ait Gerede-Kavacık volkanik kayalarının madencilik-jeolojik ayrıntılı incelenmesini konu edinmektedir. Ancak, bu makalede yalnızca fizikomekanik testlerden ve bu test sonuçlarını destekleyici kapsamda mineralojik-petrografik-jeokimyasal çalışmalardan yararlanılarak bazaltların endüstriyel kullanım türlerine uygunluğu değerlendirilmiştir.

3. İnceleme Alanı Özellikleri ve Alınan Numune Yerleri (Study Area Characteristics and Sampling Locations)

3.1. İnceleme Alanı Özellikleri (Examination Area Features)

Çalışma alanının bulunduğu Kavacık Köyü'nün batısında Bolu iline bağlı Ağızören Köyü, Külef Köyü ve Mukamlar Köyü, güneydoğusunda ise Ankara iline bağlı Şahinler Köyü bulunmaktadır. Sahada arazi çalışmaları orman ve hazine arazisinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanının kırmızı çerçeveye işaretlendiği Google Map görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir. Çalışma alanı Bolu-Gerede ile Ankara-Kızılcahamam arasındaki karayoluna yakın bir konumdadır. İnceleme alanında tüm volkanik kayaların yükseklikleri ~1300-2000 m arasındadır.



Şekil 2. Çalışma Alanı ve Çevresinin Görüntüsü (View of The Study Area And Its Surroundings) (Google Map, 2018)

3.2. İnceleme Alanından Alınan Numunelerin Jeolojik Değerlendirilmesi (Geological Evaluation of Samples Taken from the Study Area)

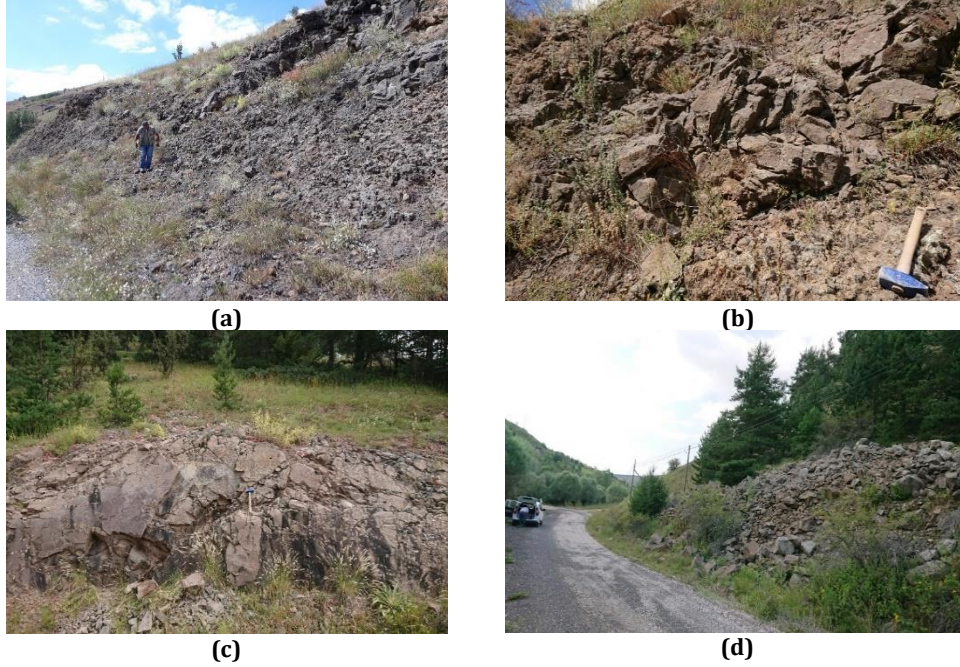
İnceleme alanından BP koduyla 2018 yılında 76 adet numune alınmıştır. Bunlar sırasıyla; BP-1 ila BP-76 arası numaralandırılmıştır. Bu numunelerin ayrıntılı incelenmesi sonrasında, Kavacık'ın güneybatısını (Gölet Bölgesi) temsilen B-1, Kavacık'ın kuzeybatısını temsilen B-2 numuneleri alınmıştır. Ayrıca, jeolojik çalışmalarda tüm kaya türlerini belirlemek maksadı ile çalışma alanından 100'ü aşan sayıda numune ("N") alınmıştır. Bunlardan sadece birkaçı bazalt açısından değerlendirmeye uygun bulunmuştur. İnceleme sahasından alınan numunelerden bazalt bileşimindeki bazılarının mevkileri ve (WGS, 84) GPS koordinatları aşağıda sunulmuştur (Tablo 1).

Tablo 1. İnceleme Alanından ve Yakın Çevresinden Alınan Bazalt Numunelerinin GPS Koordinatları ve Yerleri (GPS Coordinates And Locations of Basalt Samples Taken From The Study Area and Its Near Surroundings)

Numune no	Mevki	Koordinat		
		X	Y	Z (m)
B-1	Gölet Bölgesi (Kavacık'ın güneybatısı)	450240	4507026	1478
B-2	Kavacık'ın kuzeybatısı	451049	4510457	1361
BP-16	Kavacık'ın güneydoğusu	454750	4507464	1596
BP-25	Kavacık'ın batısı	450790	4510720	1413
BP-44	Kavacık'ın güneybatısı	448818	4505874	1543
BP-45	Kavacık'ın güneybatısı	449430	4506337	1538
BP-63	Kavacık'ın güneyi	449440	4500677	1510
N-7	Kavacık'ın kuzeybatısı	450432	4511523	1314
N-9	Kavacık'ın kuzeybatısı	450961	4510965	1349
N-10	Kavacık merkez	452194	4508112	1495
N-12	Kavacık'tan Demirler Köyü'ne giden yol ayrımından ~300 m ileride	452037	4509661	1417
N-16	Kavacık'ın doğusu, Demirler Köyü'ne giden yol üzeri	453004	4509459	1440
N-28	Şahinler Köyü'ne gelmeden 50-200 m geride	454340	4501980	1314
N-29	Şahinler Köyü'nün tam çıkışında	454400	4502100	1317
N-30	Şahinler Köyü'nün tam çıkışında, çeşmenin dibi	454390	4502130	1317
N-31	N-30'un ~10-15 m batısında	454370	4502125	1316

İnceleme sahasında bazaltlar Kavacık Köyü'nün kuzey-kuzeybatısı ve güney-güneydoğusunda gözlenirler. En iyi bir şekilde Karatepe ve Köşreli Yaylası doğusunda, çoğunlukla KD yönelimli sırtlar boyunca mostra verir. Kavacık'ın kuzeyinde Dellimolla Deresi'nin yamaçlarında döküntü/irili-ufaklı bloklar halinde ilgi çekici bir görüntü sunar (Şekil 3a). Masif ve kompakt bir yapı hakimdir (Şekil 3b). Bazaltlar birçok alanda tamamen camsı karakterde olabilen bazaltik lav ürünü obsidyenler ile sıklıkla bir arada gözlenirler (Şekil 3c). Çoğunlukla, koyu kahve, siyah ve gri renkli uzun dom ve tepeler biçiminde bulunan bazaltlar genelde altere olmuştur. İnce taneli oluşları ve siyah renkleri sahada en belirgin özelliklerini oluşturur. Genellikle gaz boşlukları içermezler. Ancak, bazı alanlarda önceden var olan bu tür boşluklar daha sonraki alterasyon ürünü epidot + klorit türü mineraller ile doldurulmuştur. Nadiren olsa da bu tür boşluklar karbonatlarca da doldurulmuştur (Şekil 3a, b, c, d).

Bazaltlar GVB'de ve güneyindeki alanlarda son derece geniş bir yayılım göstermektedir. Bu tür volkanik kayalarda çokça detaylı çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, inceleme sahasındaki bazaltlar ile korele edilebilen volkanik kayalar kalkalkalen karakterli olarak yorumlanmıştır. Aynı zamanda silisce zengin lavların manto kökenli olduğu ve kıta altı mantodan bölümsel erime ile oluşmuş olduğu öne sürülmüştür. Bu tür lavlar genellikle genişleme sisteminin etkisinde oluşmuş havzalarda gözlenmektedir (Keller vd., 1992; Tankut vd., 1998; Toprak vd., 1996; Wilson vd., 1997; Yürür vd., 2002; Karaca, 2004). Çalışılan sahada lavların Kavacık Köyü'nün güneybatısında doğrudan ayrılmış, killeşmiş andezitlerin üzerinde bir akma yapısına sahip olduğu, sıcaklık etkisi ile killeşmiş zonları kırmızı renkte pişirdiği gözlenmiştir. Buna karşın kuzeyde özellikle de Çakıl Köyü doğusunda derin derelerin tabanında yer aldığı, andezitlerin daha üst seviyelerde bulunduğu gözlenmiştir (Şekil 3d).

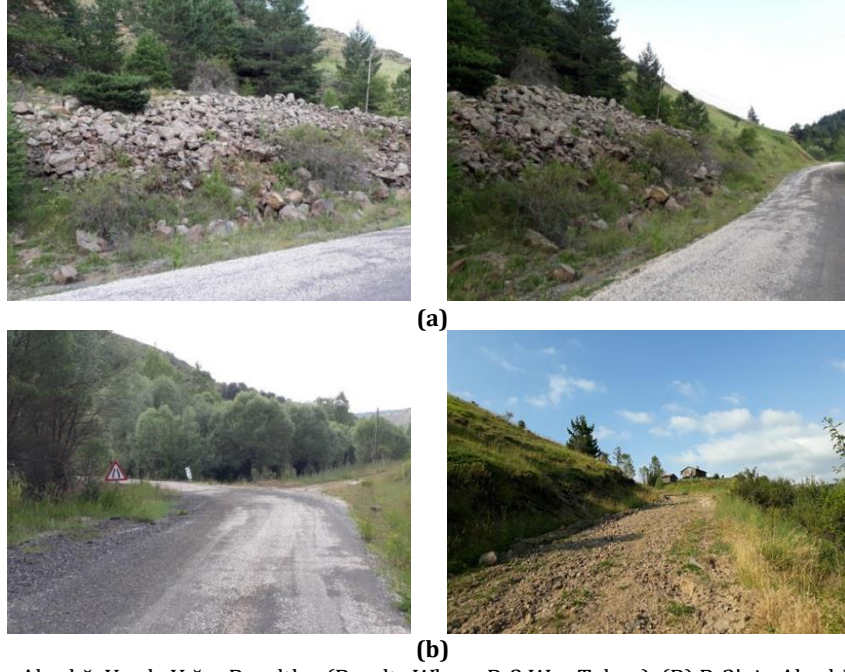


Şekil 3. (A) Delimolla Deresi Yamacında Döküntü/Yamaç Molozu Şeklinde Gözlenen Tipik Bazalt Alanı (Typical Basalt Area Observed As Slope Debris on The Slope of Delimolla Creek), (B) Delimolla Deresi Yamaçlarında Gözlenen Masif Karakterli Bazaltlar (Massive Basalts Observed on The Slopes of Delimolla Creek), (C) Kavacık'ın Güneyinde Obsediyen Oluşumlarıyla Birlikte Gözlenen Bazaltlar (Basalts Observed With Obsidian Formations in The South of Kavacık) (D) Kavacık-Çakılıköy Yolu Boyunca İzlenen Masif, Sert, Kompakt Yapılı Bazalt Blokları (Massive, Hard, Compact Basalt Blocks Followed Along The Kavacık-Çakılıköy Road)

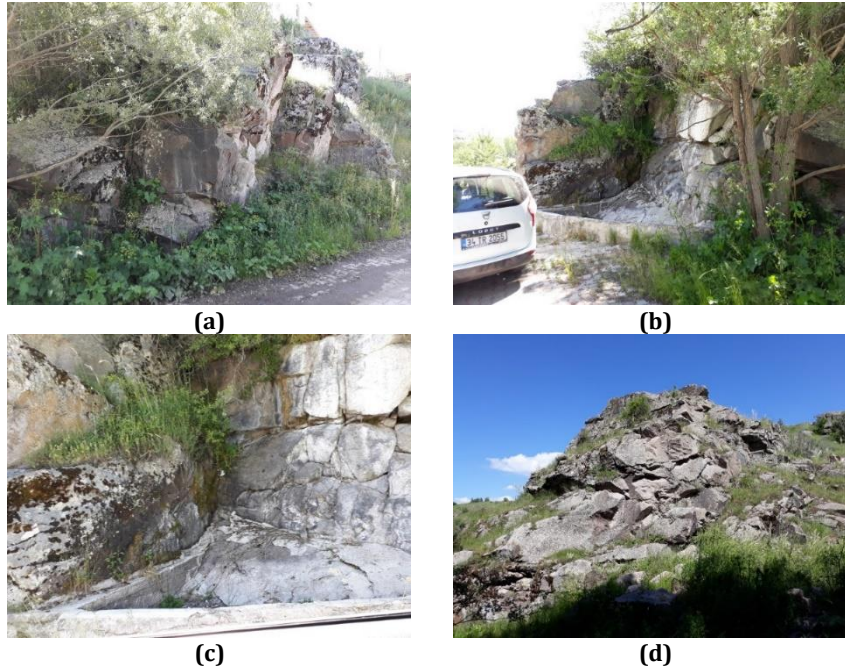
GVP'de farklı tektonik yerleşimlere sahip iki volkanizma aşaması çeşitli araştırmacılar tarafından kaydedilmiştir (Türkecan vd., 1991; Tankut vd., 1998; Wilson vd., 1997). Genel olarak proje alanının kuzeyi, özel olarak Küçükçalper-Çakılıköy arası masif, düşük ayrılmış zon olarak projenin ana amacından birini oluşturan endüstriyel değerlendirmeye uygun bazalt alanı olarak ön plana çıkmaktadır. İnceleme sahasında fizikomekanik testlerin yapıldığı B-1 ve B-2 numunelerinin bulunduğu yerler Şekil 4'de gösterilmiştir. B-1, tüm camsal dokulu bir bazalttır. Şekilde 5-a'da ise Kavacık Köprüsünün dibinde yol kenarında bazalt yığınları görülmektedir. Burası B-2'nin alındığı yerdir. B-2, siyah, ince taneli, çok sert, keskin kenar kırınımlı, masif, homojen bir volkanik kayadır. Bazalt, bazaltik andezit özelliklerine sahiptir. Porfirik dokulu volkanik kayadır. B-2'nin alındığı Kavacık'ın kuzeybatı bölgesinde yol ayrımının sağ tarafından devam eden tepe boyunca bazaltlar devam etmektedir (Şekil 5-b). İnceleme alanının güneyi içerisinde yer alan Şahinler Köyü'nün tam çıkışından ise N-29, N-30, N-31 alınmıştır (Şekil 6). Kırılmış, yığın halde, yamaçta bazaltlar, masif yapılı ~30 m eninde, 20 m yüksekliğinde çatlaklı çok büyük bloklar dikkat çekmektedir. Şahinler Köyü'ne gelmeden 50-200 m geriden yol üzerinden alınan N-28 ise boşluklu, volkanik gaz boşlukları içermektedir (Şekil 7). Bloklu yapılı masif volkanik bazaltlar görülmektedir. İnceleme alanında çok keskin kenarlı bazaltlar da gözlenmektedir. Bunlardan biri, Kavacık'ın doğusunda Demirler Köyü'ne giden yol üzerinde N-16'da gözlenmiştir (Şekil 8a). Genelde irili ufaklı, farklı boyutlu, kayaç blokları halinde, bazen 2 metre boyutu aşan, masif, ayrılmamış bloklar bu yol üzerinde izlenmektedir (Şekil 8b). Değişik bloklarda koyu renkli bazaltik özellikli kayalar görülmektedir. Her iki tarafta volkanizma şevler oluşturmuştur (Şekil 8c).



Şekil 4. B-1'in Alındığı Gölet Bölgesi (Pond Area Where B-1 Was Taken)



Şekil 5. (a) B-2'nin Alındığı Yerde Yığın Bazaltlar (Basalts Where B-2 Was Taken), (B) B-2'nin Alındığı Yol Yamacı (Road Slope Where B-2 is Located)



Şekil 6. Şahinler Köyü Bazaltları (Şahinler Village Basalts)



Şekil 7. N-28'in Lokasyonu (Location of N-28)



Şekil 8. (a) N-16'nın Lokasyonu (Location of N-16), (B)N-7'nin Lokasyonu (Location of N-7), (C) N-9 Numune Lokasyonu (Location of N-9)

Sahanın yaklaşık orta kesimlerinde Yumurcak Tepe ile Kilise Tepe arası bol miktarda obsidyen içeriği ile dikkat çekicidir. Siyah, camsı karakterde tipik özellikleri ile ön plana çıkan bu tür oluşumlar bazalt yayılım alanları ile belirgin bir ilişki yansıtır. Çoğunlukla yol yarmalarında döküntü bloklar halinde gözlenen obsidyenler yer yer gaz boşlukları içerir ve konkoidal kırılım yüzeylerine sahiptir (Şekil 8a). Camsal dokular, tüm saha bazaltları için genel bir özelliktir. Tüm camsal doku yapısından yarı camsal dokuya değişimler gösterirler. Bazı alanlarda tamamen bazaltik camdan oluşan kayaçlar (Taşilit) gözlenmiştir.

4. Fizikomekanik Testler (Physicomechanical Tests)

Standartlar doğal taşların nerelerde kullanılabileceğini ve kalite değerlerinin belirlenmesinde önemli işlev görmektedir. Standartlara uygun olan kayalar taş piyasasında yaygın pazar bulabilmekteyken özellikle dayanım özellikleri standartlardan düşük değerlerde olanlarsa piyasada kabul görememekte ya da düşük değerlerle alınıp satılmaktadır (Büyüksağış ve Gürçan, 2005). Kullanım alanları açısından öngörülen standartlar (T.S.E., DIN, B.S., vb.) değişim göstermektedir. Doğal taşların mineralojik-petrografik, fizikomekanik, teknolojik özellikleriyle belirlenen kaliteleri bulunmaktadır. Her kullanım alanında da doğal taşlardan ulusal/uluslararası standartlarda tanımlanmış beklentiler bulunmaktadır (Kulaksız, 2017). T.C. Ulaştırma Bakanlığı, Demiryollar, Limanlar, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü, Kıyı Yapıları ve Limanlar Malzeme, Yapım, Kontrol ve Bakım Onarım Teknik Esaslarına (DLH) (Karayolları Teknik Şartnamesi (KGM, 2013)) göre tahkimat taşının sık kristallerden oluşan, homojen, sert, sağlam, dona, aşınmaya ve hava tesirleri karşısında dayanıklı, süreksizlik barındırmayan ya

da az sayıda süreksizlik barındıran, (KGM, 2006)'da belirtilen "Tahkimat taşının özellikleri"ne sahip bulunması ve TS EN 13383- 1/2 standartlarında istenen özellikleri taşıması beklenmektedir (Yüksel Proje, 2007; TS EN 13383- 1 ve 2, 2013). Bu doğrultuda Gerede-Kavacık bazaltlarının TS, (KGM, 2013) ve diğer bazı standartlara/şartnamelere uygun olup olmadığı değerlendirilmiştir. Kavacık'ın kuzey batısı ile güneybatısındaki Gölet bölgesinden alınmış yaklaşık 50 kg ağırlığındaki 3 farklı numune üzerinde, agrega yönüyle testler yapılmış, numunelerin özellikle doğal taş haliyle deniz dolgusunda (blok taş olarak) veya anroşman inşaatında kullanılmasının uygunluğu araştırılmıştır. Bölge bazaltlarının özellikle deniz dolgusunda (blok taş olarak) veya anroşman inşaatında kullanımına yoğunlaşılsa da diğer kullanım alanlarına uygunluk için de bir değerlendirme yapılmıştır.

4.1. Birim Ağırlık, Özgül Ağırlık, Su Emme, Porozite ve Metilen Mavisi Deneylemleri (Unit Weight, Specific Gravity, Water Absorption, Porosity and Methylene Blue Tests)

TS 699 ve TS EN 1097-6 standardı esaslarına göre (TS 699 T1, 2009; TS EN 1097-6, 2013), birim ağırlık ve su emme deneylemleri 7x7x7 cm boyutlu küp numuneler üzerinde, özgül ağırlık deneyi kırmataş haline getirilmiş agregalar üzerinde yapılmıştır. "Kavacık Batı Bölgesi" (B-2) ve "Gölet Bölgesi" (B-1) için test sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. (Tablo 2'de belirtilen testler İTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü'nün Zemin Mekaniği Laboratuvarı'ndaki cihazlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir).

Tablo 2. Birim Ağırlık, Su Emme, Porozite ve Metilen Mavisi Test Sonuçları (Unit Weight, Water Absorption, Porosity And Methylene Blue Test Results)

Numune alım yeri	Numune no.	Kuru birim ağırlık (gcm ³)	Ağırlıkça su emme (%)	Hacimce su emme (%)	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Porozite (%)	Metilen mavisi (g/1000g)
Kavacık Batı Bölgesi	1	2,727	0,34	0,93	2,758	1,12	0,1
	2	2,729	0,31	0,86	2,757	1,01	0,1
	3	2,750	0,25	0,69	2,770	0,73	0,2
	4	2,727	0,34	0,91	2,764	1,32	0,1
	5	2,744	0,16	0,45	2,766	0,79	0,1
Ortalama		2,736	0,28	0,77	2,763	0,99	0,1
Gölet Bölgesi	1	2,549	0,07	0,17	2,570	0,82	0,1
	2	2,544	0,06	0,15	2,568	0,93	0,1
	3	2,545	0,09	0,22	2,560	0,58	0,1
	4	2,548	0,07	0,18	2,564	0,63	0,1
	5	2,543	0,1	0,25	2,570	1,05	0,1
Ortalama		2,546	0,08	0,2	2,569	0,8	0,1
DLH Limit (KGM, 2013)		Asgari	Azami	Azami	Asgari	Azami	Azami
(CIRIA ve CUR, 1991)		2,600	3	2	2,600	0-10	0,4
		Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun

(KGM, 2013)'e göre DLH limitlerinin kuru birim ağırlık ve özgül ağırlık için asgari 2,6 (g/cm³) olması istenmektedir. Kavacık Batı Bölgesi bazaltı asgari değerin üzerindedir. Ancak, Gölet Bölgesi bazaltı sınırın altında görünse de sınıra çok yakın olduğu için kullanılabilir. Ağırlıkça ve hacimce su emme, porozite ve metilen mavisi deney sonuçları da (CIRIA ve CUR, 1991)'a uygun ve (KGM, 2013)'deki DLH azami limitlerinin altındadır. Bu sonuçlar her iki bölge bazaltlarının söz konusu şartnamelere/standartlara uygun olduğunu göstermektedir. Kayaların porozitelerinin (gözenekliliklerinin) düşük çıkması yüzey sertliklerini ve dayanımlarını daha da yüksek kılmaktadır. Porozitelerinin düşük çıkması bazaltların su emme özelliğinin de düşük olmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra bazaltların su emme oranlarının düşük çıkması fenokristallerde ve hamurda killeşme gözlenmemesinde diğer bir etkili parametredir. TS 2513'e göre (TS 2513, 1977) kayaların su emme değerlerinin %1,8'den düşük, (TS 1910'a göre) gözenekliliklerinin de %2'den düşük olması istenmektedir (TS EN 1910, 2016; Deniz vd., 2017). Kayaların gözenekliliklerine göre sınıflandırılması Tablo 3'de verilmiştir. Tablo 3'e göre Kavacık Bölgesi bazaltı istenilen özelliklere uygun olup çok kompakt bir yapıya sahip bulunmaktadır.

Bazaltik kayaların masiflik/gözeneklilik yapısı kullanım alanlarını belirlemektedir. Kayaçların poroziteleri ve su emme özellikleri yükseldikçe atmosferik şartlarda daha kolayca bozılmaktadır. Gözenekli bazaltlar sıvada (1,1-1,5 g/cm³), çatı izolasyonunda ve hafif beton yapı elemanları sanayiinde kullanılmaktadır (Kulaksız, 2017; Çeliktaş vd., 2017). Yapılan deneyler sonucunda Gerede-Kavacık bazaltlarının ağırlıkça su emme değerlerinin ortalama %0,06-0,34 arasında değiştiği tespit edilmiştir (Tablo 2). Kaplama taşı olarak kullanılacak doğaltaşların ağırlıkça su emme değeri sınırının TS 1910'a göre 0,75'den küçük olması beklenmektedir. Diğer yandan TS 2513'e göre ise bazaltların doğal yapıtaşı olarak kullanılabilmesi için sahip olmaları gereken ağırlıkça su emme sınır değerinin 1,8 olduğu hatırlandığında, Gerede-Kavacık bazaltı her iki sınır değerinin de oldukça altında değerleriyle

doğal yapı taşı olarak da kullanıma uygundur. Diğer yandan, kayaçların kuru birim hacim ağırlıkları dikkate alınarak sınıflamaları ise Tablo 4’de sunulmuştur.

Tablo 3. Kayaaların Gözenekliliklerine Göre Sınıflandırılması (Tarhan, 1989) (Classification of Rocks According to Their Porosity)

Kaya sınıfı	Gözeneklilik (%)
Çok kompakt	<1
Az boşluklu	1-2,5
Orta boşluklu	2,5-5
Oldukça boşluklu	5-10
Çok boşluklu	10-15
Çok fazla boşluklu	>20

Tablo 4. Kayaçların Kuru Birim Hacim Ağırlıklarına Göre Sınıflamaları, IAEG (Classification of Rocks According to Dry Unit Weight, IAEG) (Anon, 1979; Deniz vd., 2017).

Kaya sınıfı	Kuru birim hacim ağırlığı (g/cm ³)
Çok düşük	<1,8
Düşük	1,8-2,2
Orta	2,2-2,55
Yüksek	2,55-2,75
Çok yüksek	>2,75

Bu sınıflamada kuru birim ağırlığı 2,736 ve 2,546 g/cm³ değerleriyle (Tablo 1) Gerede-Kavacık bazaltı orta ve yüksek kaya sınıfı kapsamındadır. Doğal yapı taşı ve kaplama taşı olarak kullanılan doğal kayaçların istenen birim hacim ağırlıkları sınır değerinin 2,55’ten yüksek (TS 2513, 1977; TS EN 1910, 2016) olması beklenmektedir. Gölet Bölgesi bazaltı sınır değerinde olsa da, ortalama değerleriyle Gerede-Kavacık bazaltlarının kaplama taşı ve doğal yapıtaşı olarak kullanıma uygun olduğu söylenebilir.

Birim hacim ağırlığı ve en düşük tek eksenli basınç dayanımı dikkate alınarak yapıtaşı kullanılabilirlik sınıflaması verilmiştir (Tablo 5). Bu sınıflandırma Tablo 10 ile birlikte değerlendirildiğinde Gerede-Kavacık bazaltları "ağır yapı malzemesi" sınıfında yer almaktadır (Tablo 5 ve 10). TSE 2513’e göre bu sınıfta bulunan alkalin bazaltların dış cephe kaplamasında ve taban döşemesinde kullanılabilirliği belirtilmektedir (TS 2513, 1977; Koçak, 2011).

Tablo 5. Yapıtaşı Sınıflaması (Building Block Classification) (TS 2513, 1977)

Yapıtaşı sınıfı	Birim hacim ağırlığı (g/cm ³)	En düşük tek eksenli basınç dayanımı (MPa)
Çok hafif yapıtaşı	<1,5	4,9
Hafif yapıtaşı	1,5-2	24,52
Normal yapıtaşı	2-2,5	39,23
Ağır yapıtaşı	>2,5	>39,23

Bazaltların demiryolu balast agregası olarak kullanımı içinse TS EN 1097-6 standartları esaslarına göre tane yoğunluğu ve su emme deneyleri ve diğer birtakım deneyler dikkate alınır. TS EN 1097-2 standardı esaslarına göre "Los Angeles Parçalanma Direnci" (TS7043 EN 13450 Çizelge 7 dikkate alındığında, balastlar en iyi LARB12 ile LARB14 kategorilerine girmelidir), BS 812 standardı esaslarına uygun "Crushing Value (Ufalanma) ve Ten Percent Fines Value Deneyi" sonuçlarına göre malzemenin balast olabilirliğine karar verilir. Ayrıca şu deneyler de istenebilmektedir: TS EN 933-1 standardı esaslarına göre "Demiryolu Balastı Tane Büyüklüğü Deneyi (Elek Analizi)", TS EN 933-1 standartları esaslarına göre "İnce Tane Muhtevası Deneyi", TS EN 933-1 (TS 3527) standartları esaslarına göre "Çok İnce Tane Muhtevası Deneyi", TS EN 933-3 standartları esaslarına göre "Tane Şekli - Yassılık İndeksi", TS7043 EN 13450 standardına göre "Tane Uzunluğu", TS EN 1367-2 standardı esaslarına göre "Donma ve Çözülme Direnci Tayini (Mg2SO4 ile) Deneyi", TS 699 (Tabii Yapı Taşları-Muayene ve Deney Metodları) standardına göre "Tek Eksenli Basınç Deneyi" (TS 7043, 2004; Yıldırım, 2017). TS7043 EN 13450, EK H’de (Demiryolu Balastlarının Donma ve Çözülme Karşı Direnci ile ilgili Yol Gösterici Bilgiler) en olumsuz iklim ve çevre şartlarında (Çizelge H-1 de belirtilen A ve B koşulları) balastların su emme değerlerinin ağırlıkça % 0,5’den daha düşük olması önerilmektedir (Yıldırım, 2017). Bölge bazaltlarının su emme değerleri açısından balast malzemesi olarak kullanıma uygun olduğu düşünülebilir. Ancak, henüz yapılmayan deneylerin tamamlanması halinde bölge bazaltlarının balast malzeme olarak uygunluğu hakkında bir değerlendirme yapılabilir.

Betonda kullanılan ince agregaların kil içeriğinin belirlenmesine ilişkin basit, pratik ve ucuz bir deney olan metilen mavisi deneyi TS EN 933-9’da açıklanmaktadır. Genel olarak sonuçlar metilen mavisi değerinin agregada zayıf

tabakalar yaratan killere işaret ettiğini göstermektedir. İnce agregaların, ince malzeme oranı az olmasına karşın, içerisinde kil kökenli malzeme bulundurduğunda, metilen mavisi değeri artmaktadır (Yool vd., 1998; TS EN 933-9, 2001; Çokça, 2002; Topçu ve Demir, 2006). Zararlı killer nemin etkilerine karşı hassastır. Misal su emebilirler ve kabarmabilirler, genişleme ile büzülme işleminin tekrarlanmasıyla agrega tanelerinin parçalanmasına sebep olurlar. Kil mineralleri doğal agregaların ince olarak sınıflandırılmış kısımlarında (0,063 mm) bulunabilmektedir. Yüksek oranda kil bulunması betonda ve harçlarda zarar verici etkiler oluşturmaktadır. İnce agregaların, ince malzeme oranı az olmasına karşın, içerisinde kil kökenli malzeme bulundurması, metilen mavisi değerini yükseltmekte ve beton basınç dayanımlarını azaltabilmektedir. Aşınma deneyi sonuçlarına göre metilen mavisi değeri arttıkça aşınma kaybı da artmaktadır (Topçu ve Demir, 2006). Gerede-Kavacık bazaltlarının metilen mavisi deney sonuçları 0,1 ve 0,2 g/1000g değerleriyle TS EN 933-9 ve Tablo 2’de belirtilen standartlara uygundur.

4.2. Aşınma Deneyi (Abrasion Test)

Böhme yüzeysel aşınma kaybı yöntemine göre deney TS 699 standardı esaslarına göre yapılmıştır. “Kavacık Batı (2. Bölge)” ve “Gölet (1. Bölge)” için test sonuçları Tablo 6’da verilmiştir. Tüm numuneler TS 1910’da ve TS 699’da belirtilen DLH Azami Limitlerinin altındadır. Bu değerleriyle TS 2513 de dikkate alındığında, Gerede-Kavacık bazaltlarının hem döşeme taşı hem de kaplama taşı olarak kullanılabilirliği düşünülebilir. Bu kullanım için ayrıca blok verimi konusunda çalışmaların da yapılması önerilir.

Tablo 6. Böhme Yöntemine Göre Aşınma Deneyi (Abrasion Test According to The Böhme Method)

Numune alım yeri	Numune no.	Aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	TS 699 DLH Azami Limit (KGM, 2013)	Sonuç
Kavacık Batı Bölgesi	1	3,2	15 cm ³ /50 cm ²	Uygun
	2	3,9	15 cm ³ /50 cm ²	Uygun
	3	3,1	15 cm ³ /50 cm ²	Uygun
Ortalama		3,4	15 cm ³ /50 cm ²	Uygun
Gölet Bölgesi	1	1,1	15 cm ³ / 50 cm ²	Uygun
	2	1,5	15 cm ³ / 50 cm ²	Uygun
	3	1,2	15 cm ³ / 50 cm ²	Uygun
Ortalama		1,3	15 cm ³ / 50 cm ²	Uygun

4.3. Basınç Deneyi (Pressure Test)

Kayanın yapısı, dokusu, türü, mineral tane boyutu ve bileşenleri, yeri ve çevresi, litoloji, süreksizlikler, su içeriği, kristallenme ve çimentolanma derecesi, izotropluk, homojenite ve ayrışma derecesi kayaların basınç dayanımına etki eden faktörlerdir (Yıldız vd., 2020). Bazaltların basınca karşı direnci bazalt türlerine göre değişir. Basınç dayanımı genellikle 110-350 MPa arasında bulunsun da, bazen 550 MPa’ya kadar yükselebilmektedir (Sür vd., 2001). Gerede-Kavacık bazaltlarına tek eksenli basınç dayanımı testi TS 699 standardı esaslarına uygun olarak yapılmıştır. Deneyler doğal taş numunelerinden 7x7x7 cm küp şeklinde kesilen örnekler üzerinde yapılmıştır. “Kavacık Batı” ve “Gölet” Bölgesi için test sonuçları Tablo 7’de sunulmuştur. İncelenen tüm numunelerin doğal yapı taşı olarak kullanılabilmesi için KGM, 2013’de veya TES 2513’te istenen asgari 500 kgf/cm² (~50 N/mm²(50 MPa)) şartlarını fazlasıyla sağlamaktadır. Bölge bazaltları aynı zamanda yüksek/çok yüksek dirençli kaya sınıfı içerisinde (Tablo 8).

Tablo 7. Basınç Deneyi (Pressure Test)

Numune alım yeri	Numune no.	Basınç dayanımı (MPa)
Kavacık Batı Bölgesi	1	96,1
	2	140,1
	3	158,4
	4	110
	5	154,2
Ortalama		131,7
Gölet Bölgesi	1	195,2
	2	201,1
	3	186,8
	4	187,9
	5	215,5
Ortalama		197,3

Tablo 8. Tek Eksenli Basınç Dayanımına Göre Kayaların Sınıflandırılması (Classification of Rocks According to Uniaxial Compressive Strength) (Dere ve Miller, 1966)

Kaya sınıfı	Tek eksenli basınç dayanımı (Mpa)
Çok düşük dirençli	<25
Düşük dirençli	25-50
Orta dirençli	50-100
Yüksek dirençli	100-200
Çok yüksek dirençli	>200

Kayaçların bileşimini oluşturan minerallerin yoğunluk ve sertlik değerleri kayaçların dayanımını etkilemektedir. Kayaçların fenokristallerinin sertliği ne kadar yüksek olursa bu kayaçların dayanımı da o oranda yükselmektedir. Bunlar bütünüyle dikkate alındığında kayaçların dayanım özellikleri kullanım alanlarını etkilediğinden, kayaçların içindeki fenokristallerin dağılımı, bileşimleri ve sertlik değerleri de kullanım alanlarını saptamada önemli kriterler arasındadır. Fenokristallere ek olarak, kayanın hamur malzemesinin miktarı ve fenokristal oranı da kayanın dayanımını etkilemektedir. Kayaç içinde sertliği yüksek minerallerin hamur malzemesine kıyasla oranı arttığı zaman kayanın dayanımı artış göstermekte, yine, sertliği düşük minerallerin oranının hamur malzemesine kıyasla oranı arttığı zaman kayanın dayanımı düşebilmektedir. Kayanın dayanım değerini belirleyen tüm bu iç yapısal özellikleri kayanın kullanım alanları konusunda da belirleyici faktörler arasındadır (Çeliktaş vd., 2017). Tablo 10 incelendiğinde, çalışma sahasından seçilen numunelerde plajiyoklaz, piroksen ve camsı matriks oranlarının belli bir oranda yüksek olduğu görülmektedir. Bu bileşenlerin tek eksenli basınç dayanımını arttırdığı söylenebilir. Kavacık Batı ve Gölet Bölgeleri arasında yaklaşık 3,5 km'lik bir kuşbakışı uzaklık bulunmaktadır. Her iki bölgenin basınç dayanım testlerinden farklı sonuçlar elde edilmesi, bazaltlarındaki ana mineral oranlarının değişikliğinden ve ayrışma derecelerinin farklılığından kaynaklanmaktadır. Buna kısmi hidrotermal ayrışmayı da eklemek gerekir.

4.4. Dona Dayanıklılık Deneyi (Frost Resistance Test)

Doğal taş numunelerinden oluşturulan agregalarda TS EN 1367-2 standardına uygun şekilde magnezyum sülfat çözeltisi kullanılarak kimyasal yöntemle dona dayanıklılık deneyi yapılmıştır (Tablo 9). Deney sonuçlarına göre Gerece-Kavacık bazaltları dona dayanıklılık açısından (CIRIA ve CUR, 1991) standartlarına uygundur.

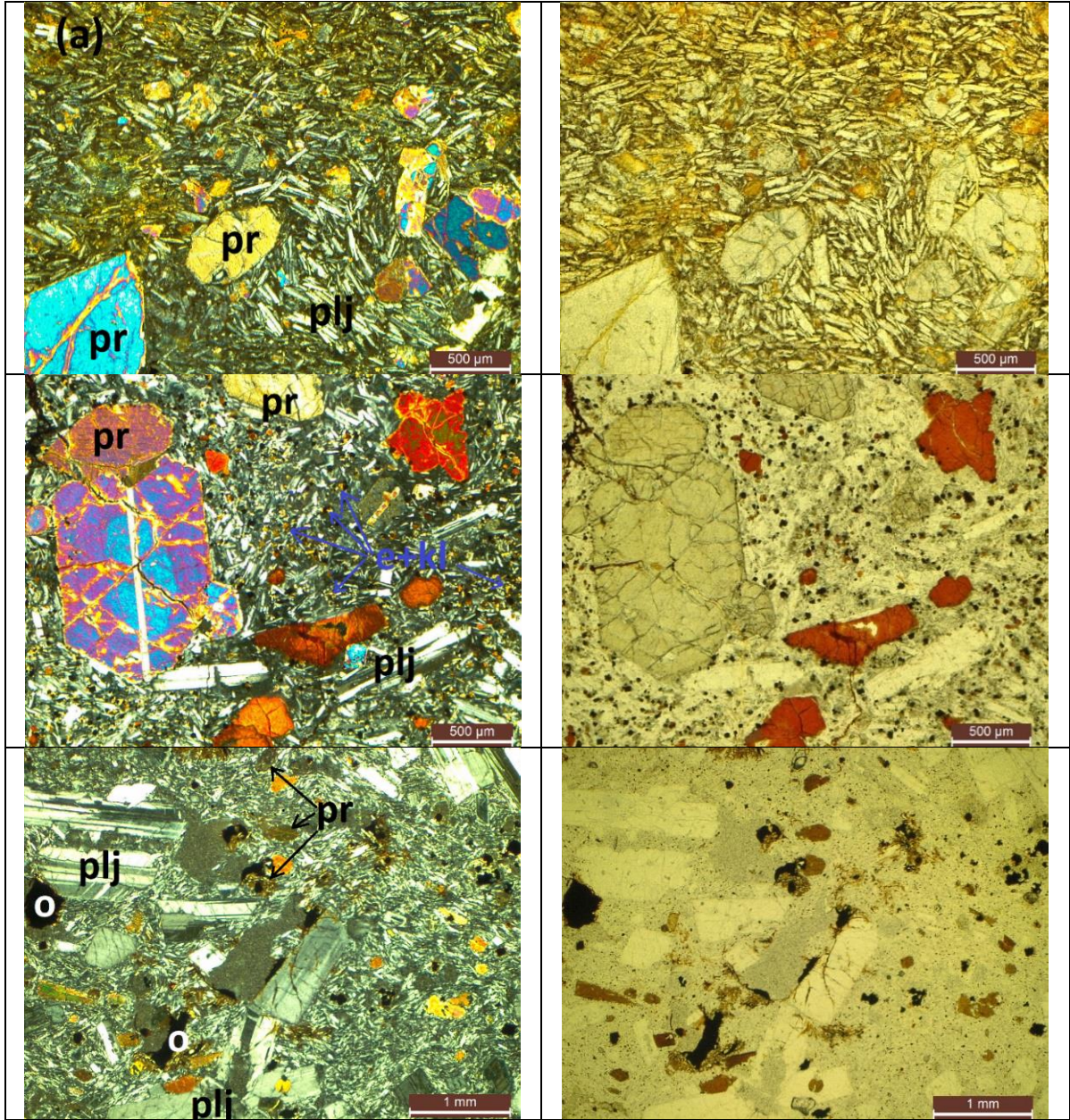
Tablo 9. Dona Dayanıklılık Deneyi (Frost Resistance Test)

Numune alım yeri	Geçen elek açıklığı (mm)	Kalan elek açıklığı (mm)	Deneyden sonra ince elekten geçen miktar (%)	Sonuç (CIRIA ve CUR, 1991)
Kavacık Batı Bölgesi	14	10	1,9	İyi (Uygun)
Gölet Bölgesi	14	10	0,9	İyi (Uygun)

5. Mineralojik-Petrografik İncelemeler (Mineralogical-Petrographic Investigations)

Polarizan mikroskop altında yapılan çalışmalar, sahadaki bazalt kayaçlarının esas olarak plajiyoklaz, piroksen minerallerinden oluştuğunu, bunlara daha az oranda hornblent, mika ve olivinin eşlik ettiğini ortaya koymuştur. Tali mineraller olarak, ilmenit, manyetit, sfen ve zirkon türü oksit ve silikat minerallerine rastlanılmıştır. Ayrışma ürünü olarak klorit, epidot ve kalsit mineralleri belirginleşmiştir. Bazaltlara ait mikroskop görüntüsü Şekil 9'da verilmiştir. İnce kesit çalışması yapılan toplam 21 adet bazalt örneğinin mineralojik bileşim ve mineral yüzdeleri %40-60 bazalt plajiyoklaz, %35-55 mafik mineral şeklinde bir değişim ortaya koyar. Plajiyoklazlar en bol bulunan fenokristallerdir ve büyük çoğunlukla labrador bileşimlidir. Bu mineral taze olmakla birlikte, yer yer ayrışma sonucu killeşmiş veya zayıfça karbonatlaşmıştır. Az da olsa zonlu kristaller halinde de gözlenir. Mafik mineraller, fenokristaller halinde de gözlenebilen ojit türü piroksen mineralleridir. Bu mineraller 1 mm üstü boyutlara çıksa da kristal büyüklükleri esas olarak 0,4 mm ve altıdır. Diğer mafik minerallerden olivin ince kristallidir ve fayalit bileşimlidir. Az miktarda rastlanılan hornblent türü amfibol mineralleri, ince taneler veya kalıntı halinde yer yer etkili şekilde klorit ve epidot minerallerine dönüşmüştür. Bazaltlar tüm kristalli, yarı kristalli ve camsal dokulu, camsal hamur içinde mikrolitlerin oluşturduğu akma dokuları gösterirler. Akma yapıları pek çok örnekte belirgindir ve trakitik dokuyu andırır. Tüm kristalli dokularda intergranüler ve porfirik doku yaygındır. Boşlukları camdan oluşan ofitik doku ilgi çekicidir. İnceleme sahasındaki bazaltlarda ayrışma bazı alanlarda çıplak gözle bile ayırt edilse de, genel olarak ayrışma verileri zayıf gelişmiştir. Sasuritleşme ve kloritleşme şeklinde ayrışma olaylarından bahsetmek mümkündür. Sasuritleşme sonucunda plajiyoklazlar ayrışarak epidot-zoizit ve kalsit, daha az olmak üzere serisit ve kil mineralleri gelişmiştir. Sahada hidrotermal ayrışmanın en iyi gözlemlendiği alanlar,

Şahinler Köyü kuzeyi ile batıda Güney Yayla civarındır. Sahada iki ayrı bölgeyi temsil eden bazalt numunelerinin makroskopik ve mikroskopik incelemesinin açıklaması Tablo 10'da sunulmuştur.



Şekil 9. Bazaltların Polarizan Mikroskop Altındaki Görüntüleri: Plj: Plajoklaz; Pr: Piroksen; O: Opak; E: Epidot; Kl: Klorit
(Images Of Basalts Under A Polarizing Microscope: Plj: Plagioclase; Pr: Pyroxene; O: Opaque; E: Epidote, Kl: Chlorite)

Bazaltların endüstriyel kaya olarak yapısı, dokusu, ve mineralojik bileşimi kullanım kriterlerini oluşturmaktadır (Kulaksız, 2017). Bazalt makroskopik açıdan koyu gri-siyah renkli, ince taneli masif yapıda zor kırılabilir özellikte olup, mikroskop altındaysa, iri taneli piroksen, plajoklaz ve olivin kristalleriyle bunları çevreleyen ince kristalli, mikrolitli girift doku altında matris gözlenmektedir (Uz, 1999; Şekil 9). Volkanik cam içeriği daha fazla olan bazalt, kristal dokulu bazaltlara oranla daha siyah ya da koyu kahverengi bir renkte ve kırılmış yüzeylerinde mat bir görünümde (Erkan, 2013; Akbulut vd., 2016). İnceleme sahasının bazı bölgelerinde volkanik cam miktarının oldukça yükseldiği, hatta obsidyen benzeri oluşumlar tespit edilmiştir. Bazalt alanlarından alınan örneklerin ortalama mineral bileşim/modal oranları Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 10. Seçilen Numunelerin Makroskopik ve Mikroskopik İncelemesi (Macroscopic And Microscopic Examination of Selected Samples)

İncelemeler	B-1	B-2
Makroskopik İnceleme	Koyu siyah renkli, yoğun, sertlik 6,5-7 Mohs, ayrışma izlenmez, ince taneli görünümde, volkanik özellikli kayadır.	Volkanik porfirik, masif, kompakt, yoğun mikrotaneli masif, kompakt, homojen, sertliği, S= 6,5-7 Mohs (Sert kayac grubuna dahildir). Seyreltik HCl ile muamelede reaksiyon vermez. Bu nedenle karbonat grubu minerallere rastlanmaz.
Mikroskopik inceleme	-Doku: Mikrolitik porfirik, ince-orta taneli Fenokristaller: az oranda, ve bunları çevreleyen, ince taneli mikrolitik, yönlü grift plajioklaz (andezin) mineralleri ile çevrelenmiştir. Mikrolitik matiks içinde ayrıca opak (manyetit) mineralleri ile, bir miktar volkanik cam içerir. <u>-Fenokristaller:</u> -Plajioklaz, orta taneli, öz şekilli, oval ve polisentetik ikizli (labrador bileşimli) -Piroksen: orta taneli, renkli, öz şekilli, tek nikolde renksiz ve kırılma indisi yüksek (1,70-1,75). -Matriks: Mikrolitte plajioklaz iğnemi, yönlü, veya girift olup, beraberinde opak (manyetit) mineraller, ve volkanik cam bulunur.	Doku: Porfirik volkanik. Fenokristaller ve bunları çevreleyen mikrotaneli plajioklaz, (%15) bol oranda opak mineraller bulunmaktadır. <u>-Fenokristaller:</u> - Plajioklaz: Orta taneli, öz şekilli (labrador bileşimlidir). - Piroksen: Oval ve öz şekilli, renklidir. <u>- Matriks:</u> Mikrotaneli, iri – orta taneli mineralleri kuşatan, plajioklaz mikrolitleri yönlüdür. Beraberinde opak – manyetit ve piroksen içerir.
Kayaç	Volkanik porfirik bazalt	Bazalt

Tablo 11. Numunelerin Mineral Bileşimleri ve Modal Oranları (Mineral Compositions And Modal Ratios of The Samples)

	B-1		B-2		
	Bileşen/Mineral	Modal oran (%)	Bileşen/Mineral	Modal oran (%)	
Fenokristal (%18-25)	Plajioklaz (labrador)	8-10	Fenokristal (%22-30)	Plajioklaz (labrador) orta-iri taneli	10-15
	Piroksen	10-15		Piroksen	12-15
Matriks (%75-82)	Mikrolit plajioklaz	60-70	Matriks (%70-78)	Plajioklaz	30-31
	Opak - Manyetit	8-10		Piroksen	13-16
	Volkanik cam	10-15		Opak - Manyetit	16-18
	-	-		Volkanik cam	11-13

6. Jeokimyasal İncelemeler (Geochemical Investigations)

Çalışma alanındaki kayaç ve alterasyon zonlarından sistematik alınan örnekler, mineralojik ve petrografik incelemelerini takiben kimyasal analiz için hazırlanmış, seçilen numunelerde ana, iz ve nadir toprak element analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerekli sayıda örnek, önce öğütme, daha sonra da jeokimyasal analiz yapılmak üzere yurt içi ve yurt dışı (Kanada) olmak üzere farklı analiz şirketlerinin laboratuvarlarına gönderilmiştir. Majör oksit, iz ve nadir toprak elementleri analizinde İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektroskopisi (ICP-MS) yöntemi kullanılmıştır. Proje alanı volkanik kayaçlarının majör oksit kimyasal bileşimleri (ağırlıkça %), proje sahası kayaçlarının iz ve nadir toprak elementlerinden bazılarının içerikleri (ppm) sadece 7 adet bazalt numunesi için Tablo 12’de verilmiştir. Volkanik bazalt örneklerinin kimyasal analizlerinden hareketle Zr/TiO₂-Nb/Y diyagramındaki adlandırılmaları Şekil 10’da sunulmuştur. Bu şekilde teknolojik özelliklerin belirlendiği örnekler, sahadaki diğer bazalt örneklerinde olduğu gibi alkali bazalt aralığında kalmaktadır. Bu sonuç bazaltların mikroskopik özellikleri ile de uyumluluk göstermektedir.

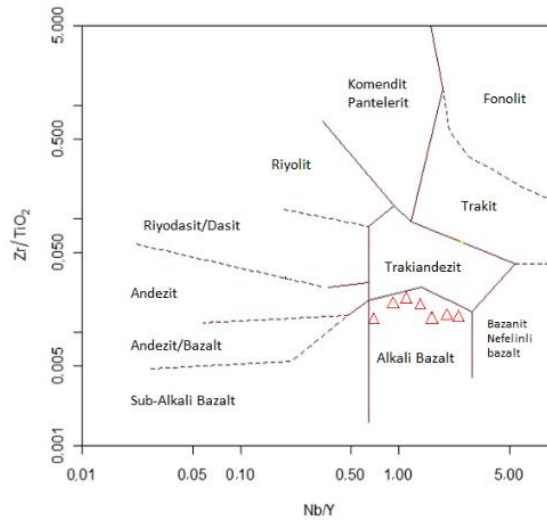
Bazalt, kimyasal açıdan %45-52 arasında SiO₂, yüksek magnezyum ve demir içeren bazik bileşimli kaya olarak tarif edilir (Uz, 1999). Bazaltın içindeki silis miktarı attıkça, sertlikleri de artmaktadır (Kulaksız, 2007). Bileşiminde bulunan demir, ona ağırlık kazandırmaktadır (Sür vd., 2001). Yapılan analizlere göre Gerece-Kavacık bazaltlarında

demir oranları %4,89 ve 5,37'dir. Bu durum bazaltların beton agregası olarak kullanımında istenen standartlara gelmesinde, asgari yoğunluk değerlerine ulaşmasında bir etki yaratmıştır.

Çalışma alanındaki bazaltlar (KGM, 2013)'de belirtilen "Tahkimat taşında aranan asgari özellikler" kapsamında (ASTM C 295, 1990) standardına da uygunluk açısından değerlendirilebilir. Bu kapsamda kristallerin iyi kenetlenmiş, kil minerallerinin ve eriyebilir minerallerin olmaması istenmektedir. Ayrıca TS 699 standardına göre doğal taşlarda olması istenmeyen killi, çürük damarların, boşluk, çatlak, dolgu ve yapay birleştiriciden oluşan kusurlar Tablo 12'de seçilen numunelerde bulunmamaktadır. Mineralojik veriler dikkate alındığında gerek Kavacık Batı bölgesi, gerekse de Gölet bölgesinden alınan bazaltların geneli itibariyle söz konusu standartlara uygun olduğu söylenebilir.

Tablo 12. Bazı Bazalt Numunelerinin Jeokimyasal Analiz Sonuçları (Geochemical Analysis Results of Some Basalt Samples)

Numuneler/Bileşenler	B-1	B-2	BP-16	BP-25	BP-44	BP-45	BP-63	(Parnas vd., 2007)'deki bazalt yünü uygunluk
SiO ₂ (%)	49,10	50,40	47,50	48,60	48,30	50,10	52,20	B-1, B-2, BP-45
Al ₂ O ₃ (%)	17,05	18,25	15,70	15,90	17,00	17,55	16,70	X
Fe ₂ O ₃ (%)	7,09	8,06	8,60	9,01	7,79	7,23	7,95	
CaO (%)	0,00	7,91	8,52	8,76	9,64	8,81	8,98	~BP-44
MgO (%)	6,68	4,94	10,05	9,44	7,28	6,80	4,29	B-2, BP-44, BP-45
Na ₂ O (%)	4,04	4,05	3,60	3,61	3,55	4,32	4,48	X
K ₂ O (%)	2,37	1,30	1,72	1,97	2,25	2,55	1,24	X
Cr ₂ O ₃ (%)	0,025	0,01	0,058	0,068	0,024	0,02	0,027	
TiO ₂ (%)	1,40	1,28	1,42	1,46	1,42	1,41	1,18	Tüm numuneler
MnO (%)	0,12	0,13	1,42	0,14	0,13	0,12	0,13	
P ₂ O ₅ (%)	0,71	0,41	0,55	0,51	0,72	0,71	0,86	
SrO (%)	0,09	0,07	0,06	0,08	0,12	0,10	0,08	
BaO (%)	0,07	0,03	0,07	0,07	0,08	0,07	0,08	
LOI (%)	2,36	2,47	1,73	1,62	2,32	1,34	1,66	
Y (ppm)	18,8	22,5	19,7	18,6	19,5	18,9	24,9	
Zr (ppm)	192	192	171	167	190	199	231	
Ce (ppm)	72,6	55,8	54,6	52,3	79,2	76,1	110,5	
Th (ppm)	2,42	0,97	20	<20	<20	<20	20	
U (ppm)	3,08	1,41	10	10	10	<10	10	



Şekil 10. Bazalt Örneklerinin Zr/TiO₂-Nb/Y Diyagramındaki Adlandırılmaları (Wincshester ve Floyd, 1977) (Naming of Basalt Samples in Zr/TiO₂-Nb/Y Diagram)

Hazır beton olarak ya da hızlı tren raylarının inşasında balast malzemesi olarak kullanılacak taşın toplam SiO₂ içeriğinin %45-52 arasında, alkali (Na₂O+K₂O) içeriğininse %4'ten düşük olması beklenmektedir (Deniz vd., 2017). Gerede-Kavacık bazaltlarının SiO₂ içerikleri %45-52 aralığındadır (BP-63 %52,2 olsa da sınır değere yakın olduğundan bazalt olarak kabul edilmiştir). Silis içerikleri yönüyle bir problem görünmemektedir. Alkali (Na₂O+K₂O) toplamı ise B-1 %6,41, B-2 %5,35, BP-16 %5,32, BP-25 %5,58, BP-44 %5,8, BP-45 %6,87, BP-63

%4,72'dir. Bu durum bölge bazaltlarının *hazır beton ve balast malzemesi* açısından uygun olamayabileceğine işaret etse de fizikomekanik testler, bu kayaların doğal taş haliyle deniz dolgusunda (blok taş olarak), anroşman inşaatında ve benzeri işlerde kullanılabilirliğini gösterir. Alkali içeriğindeki artış muhtemelen örneklerin az da olsa ayrıştığına işaret eder. Alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) toplamı %4'e en yakın numune BP-63'dür. Jeokimyasal yönden, bu ve diğer numunelerin olduğu lokasyonlar çevresinde toplam alkali içerikleri yönüyle ilave çalışmaların yapılması düşünülebilir. Bazaltların endüstriyel kullanımında, akılda tutulması gereken önemli bir husus da kimyasal analizlerin kendi başına tek bir faktör olmadığı, fizikomekanik testlerle desteklenmesi gerektiğidir.

Bazalt yünü olarak kullanılacak bazaltların ise SiO_2 değerinin %48,8-51,0 arasında, Al_2O_3 %14,0-15,6, $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ %7,3-13,3, CaO %10,0, MgO %6,2-16, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ %1,9-2,2, TiO_2 %0,9-1,6, MnO %0,10-0,16 arasında olması beklenmektedir (Parnas vd., 2007). B-1, B-2 ve BP-45 numunelerinin SiO_2 değerleri istenen aralıktadır. Al_2O_3 değerleri belirtilen aralıktadır olmasa da bu aralığa yaklaşan numuneler bulunmaktadır. CaO değeri %10'a en yakın numune BP-44'dür. MnO için BP-16 hariç tüm numuneler istenen aralıktadır. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ hariç diğer bileşiklerde bazı numuneler istenen aralıklarda görünmektedir. Diğer yandan, kaya yünü üretimi beklenen jeokimyasal özellikleri farklı standartlarda ve kaya yünü kullanımı için açılmış bazalt ocak değerlerinde Parnas vd., 2007 ile uyumlu olmayabilmektedir (Tablo 13). Bu durum *kaya yünü* istenen özelliklere gelmesinde maliyeti etkileyen faktörler olarak ortaya çıkmaktadır.

Tablo 13. Kaya Yünü Olarak Kullanılacak Bazaltın Sahip Olması Gereken Kimyasal Özellikleri (Chemical Properties of Basalt to be Used As Rock Wool) (Deniz vd., 2017).

Bileşik (%)	CI-2212	CI-2112	Whitlow Ocağı Washington	Grant County, Vantage, Washington	Yanova, U.S.S.R.	Ermenistan	Kaya yünü	Kaya yünü	Kaya yünü	Kayseri Erkilet ocağı	Ankara Sincan Kaya yünü fabrikası beklentisi
Na_2O	3,42	4,38	3,09	2,8	2,9	3,6	0,3	11		5,0	
MgO	7,06	5,25	5,25	4,6	5,6	11,1	3,3	3,5	6,2-16	4,49	6-12
Al_2O_3	13,89	14,16	13,9	14,3	15,2	16,6	14,8	2	14-15,6	20,4	12-18
SiO_2	50,32	53,78	49,1	54,3	51	45,4	55,2	73	48,8-51	46,8	40-48
P_2O_3	0,04	0,06									
K_2O	4,0	3,58	1,26	1,2			0,2	0,5		0,39	
CaO	5,6	5,28	9,43	8,3	8,3	13	18,7	5,5	10	10,5	12
TiO_2	0,67	0,76	3,16	1,75	1,6	0,6			0,9-1,6	0,85	1-2,5
MnO	0,19	0,18									0,1-0,5
Fe_2O_3	12	11,79	2	14,6	5,9	9,7	0,3	0		11,1	13
FeO			11,98	9,8	8	1,3	0	0			
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	7,42	7,96	4,35	4,0			0,5	11,5	7,3-13,3	5,39	4,5

Tablo 13'de Whitlow Ocağı, Grant County/Vantage, Yanova U.S.S.R, Ermenistan verileri (Sheldon vd., 1977), kaya yünü verileri (Parnas vd, 2007)'den alınmıştır. CI-2212 ve CI-2112 değerleri ise Kırşehir Çiçekhane Tepe bazaltı sahalarına aittir (Deniz vd., 2017). Tablo 12'deki tüm numunelerin ise Na_2O değerleri %3,55-4,48 arasında, K_2O değerleri ise 1,25-2,55 arasında değişmektedir. Başta $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ değerleri olmak üzere, Al_2O_3 , K_2O , CaO , TiO_2 , MnO , Fe_2O_3 değerleri de dikkate alınarak bölgedeki bazaltların *kaya yünü* olarak üretimi için $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ hariç diğer bileşiklerde bazı numunelerin yüzdeleri Parnas vd., 2007'nin öngördüğü aralıklarda görünse de, Bölge ve civarındaki bazaltların kaya yünü olarak üretimi için araştırmalara devam edilmesinde fayda olacaktır (Örneğin demirin % değerlerinin yüksek olması kaya yünü fabrikalarında ısı iletimi arttırmaktadır. En fazla çıkan ürün / giren oranında verimlilik düşer. Bu da üretim maliyetini arttırır). Tablo 13'de olup da Tablo 12'de jeokimyasal analiz sonucu olmayan diğer bileşiklerin ağırlıkça miktarının yeni jeokimyasal analizlerle belirlenmesi bölgedeki bazaltların *kaya yünü* olarak kullanılabilirliğine karar verilmesine yardımcı olabilecektir.

Ana elementler haricinde eser elementlerin de kaya içindeki bolluk oranları oldukça önemlidir. Zira bazı elementlerin doğal radyoaktif özellikleri vardır. Kayalardaki silikanın yükselişine dayalı olarak Th ve U konsantrasyonları da yükselmektedir (Çeliktaş vd., 2017). Kayaların sahip oldukları doğal radyasyon oranları barındırdıkları potasyum (K), zirkon (Zr), seryum (Ce), itriyum (Y), uranyum (U) ve toryum (Th) elementleri ile doğrudan ilişkilidir. Yaşam alanı olarak kullanılan binalar dışarıdan gelen kozmik ve karasal kaynaklı radyasyona

karşı koruyucu etkiye sahiptir. Buna karşın, bina yapımında ve dekorasyonunda kullanılan yapı malzemelerindeki radyonüklid içeriğine dayalı olarak bina içindeki radyoaktivite bina dışındaki değere kıyasla daha yüksek olabilmektedir (Koralay vd., 2017). Doğal radyonüklidler sebebiyle oluşabilecek, iç ve dış radyasyon zarar indeksleri bazı eşitliklerden yararlanılarak hesaplanmaktadır. Bakınız, (UNSCEAR, 2000; Yaprak, 2009; Çıyrak, 2010). Asidik volkanitler için K, Th ve U elementleri için sınır değerleri sırasıyla 1,1-41,0 ppm, 0,8-16,4 ppm ve %1,0-6,2'dir. Bazik volkanitlerdeki Th sınır değeri 0,05-8,8 ppm, U için 0,03-3,3 ppm ve K içinse %0,06-2,4 arasındadır (Uyanık ve Akkurt, 2009). Kavacık sahasında Th, U ve K değerleri sırasıyla B-1 için 9,8; 3,08; 2,42 ppm; B-2 için 4,34; 1,41; 0,97 ppm'dir. Diğer 5 bazalt numunesinde K değerleri %1-2,4 arasında değişmektedir (Tablo 12). (B-1 ve B-2'nin jeokimyasal analizi diğer numunelere kıyasla farklı bir laboratuvarında yaptırılmıştır. Bu nedenle Th ve U değerleri açısından değerlendirme sadece B-1 ve B-2 için yapılabilmektedir. Diğer numunelerin <10 ve <20 değerleriyle hassas ölçüm yapılamadığını göstermektedir. Bu durum dikkate alınarak diğer numuneler radyasyon açısından değerlendirmeye katılmamıştır). Bu değerleriyle bölge bazaltları (Uyanık ve Akkurt, 2009)'un belirlemiş olduğu bazik volkanit sınır değerleri içerisinde kalmaktadır. Bu durum Gerede-Kavacık bazaltlarının radyoaktif açıdan zarar verici seviyede olmadığını göstermektedir.

7. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Kavacık bölgesi bazaltlarının kalitesi fizikomekanik testler aracılığıyla belirlenmiştir. Buna göre inceleme bölgesinden alınan bazaltların çalışmada belirtilen standartlarda/şartnamelerde istenen özelliklere uyduğu, böylelikle doğal taş haliyle deniz dolgusunda (blok taş olarak), anroşman inşaatında ve benzeri işlerde kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır. Bundan daha önemlisi, Gerede-Kavacık bazaltlarının ağır yapı malzemeleri tasnifinde yer alması, fizikomekanik özelliklerinin istenilen değer aralıklarında bulunması, gözenek ve su emme özellikleri az olmasından dolayı dayanımlı olması, kaplama taşı, doğal yapıtaşı olarak, dış cephe kaplamasında, taban döşemesinde de kullanım standartlarına uygun olabileceğini göstermektedir. Çalışma bölgesinde yer alan bazaltların kullanım alanlarının belirlenmesi için yapılan fiziko-mekanik ve minerolojik analiz sonuçlarının kayacın deniz dolgusu, anroşman inşaat malzemesi veya kaplama taşı ve doğal yapıtaşı olarak kullanılıp kullanılmayacağı konusunda yardımcı olacağına inanılmaktadır. Diğer yandan bu veriler kesin bir karar vermek için yetersiz olabilir. İç ve dış döşeme, yer döşemesi gibi bazalt kullanımları içinse kayacın öncelikle belli bir blok verimine, levha haline getirilmeye uygun olması, ve iyi cila alabilme özelliğine sahip olması gerekmektedir. Kavacık Bölgesi bazaltlarının doğal yapı ve/veya kaplama malzemesi olarak kullanılması konusunda blok verimi üzerinde doğrudan çalışma yapılmamış olmakla birlikte, bölge bazaltlarının masif, kompakt, çatlaksız yapıları ve dokuları dikkate alındığında blok veriminin yüksek olduğu söylenebilir. Genel olarak, ayrışma verileri göstermeyen sert, masif, kompakt ve daha da önemlisi çatlaksız bazaltların yüksek blok verimine sahip olacağı bilinen bir husustur. Makale içeriğinde; bazaltların masif, kompakt ve çatlaksız olduğuna belirgin şekilde vurgu yapılmış olması ile bir anlamda bu kayaçların blok verimine atıfta bulunulmuştur. Diğer bir ifadeyle doku, yapı, ve ayrışma verileri de göz önüne alındığında, tüm bu veriler blok verimini desteklemekte, ve blok veriminin istenilen ölçüler içinde olacağını göstermektedir. Cila alma özelliğinin tespiti içinse yeni testlerin yaptırılması önerilir.

Kavacık Bölgesi bazaltları aynı zamanda yüksek/çok yüksek dirençli kaya sınıfındadır. Ancak, Tablo 12'de verilen jeokimyasal değerleri ve farklı standartlara göre henüz yapılmayan fizikomekanik testleri göz önüne alındığında bölge bazaltlarının hazır beton ve balast malzemesi açısından uygun olamayacağı söylenebilir. Ancak, fizikomekanik testler, bu kayaçların doğal taş haliyle deniz dolgusunda (blok taş olarak), anroşman inşaatında ve benzeri işlerde kullanılabilirliğini gösterir. İstisnaen sahanın güneybatısında bulunan BP-63 dikkate alınarak bu numunenin bulunduğu bölge civarında yeni araştırmalar yapılabilir. Bölge ve civarındaki bazaltların kaya yünü olarak üretimi açınsından farklı lokasyonlarda yeni jeokimyasal analizler yapılarak, çıkan sonuçlara göre *kaya yünü* olarak kullanılabilirliğine karar verilebilir. Hemen hemen Türkiye'de kaya yünü üretilebilecek birçok bazalt sahasında jeokimyasal veriler hemen hemen aynıdır. Bu durum kaya yünü fabrikalarına hammadde temin eden Kayseri Erkilet bazalt ocağı jeokimyasal verilerinden göze çarpmaktadır. Bu sahanın verileriyle Kavacık sahasının bazalt özellikleri hemen hemen yakındır. Bazaltlardan kaya yünü üretileme noktasında özellikle nakliye masrafları ön plana çıkmaktadır.

Bölge bazaltlarının bulunduğu konum itibarıyla Gerede, Kızılcahamam, Çamlıdere ilçeleri gibi birçok yerleşim yerine yakın bulunması, Bolu-Gerede Ankara-Kızılcahamam arası karayoluna yakın bulunması, bölgede geniş yayılım sergilemesi ve kırılma şartlarının da uygun olması dikkate alındığında bazalt işletmeciliğine uygun görünmektedir. Ankara ve çevresindeki il ve ilçelerde çeşitli yatırım projelerinde kullanılan bazaltlara olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Artan bu talep karşısında Gerede-Kavacık Bölgesi bazaltlarının ayrıntılı jeolojik, petrografik, jeokimyasal ve fizikomekanik analizleri yapılmak suretiyle yeni bir bazalt kaynağı olarak değerlendirilebileceği sonucuna varılmıştır. Bölgedeki bazaltların çalışma alanının dışına doğru yayılımlar gösterdiği de dikkate alınarak bölge ve civarındaki bazaltların üretimi için yeni araştırmalar ve fizibilite çalışmaları yapılması önerilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi BAP Projesi Koordinasyon Birimi tarafından MGA-2018-41507 numaralı 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)

- Acar, A., Taga, H., Dinçer, İ., 2004. Liman dolgusunda kullanılacak pliyokuvaterner bazaltların (Yumurtalık-Adana) fiziko-mekanik özelliklerinin incelenmesi. KAYAMEK 2004-VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, s.77-84, Sivas.
- Akbulut, A., Demir, B.G., Güngör, N., 2016. Değeri yükselen bir maden: Bazalt. Madencilik Türkiye Dergisi, 55, 80-82.
- Aksoy, C.O., 1999. Kırmataş üretim yöntemlerinin ekonomik analizi. 3. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İzmir-Türkiye, 97-103, 14-15 Ekim 1999.
- Anon, 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1. Rock and soil materials. Bull Int Assoc Eng Geol. 19, 364-371. (Deniz vd., 2017)'den alıntılanmıştır.
- Aral, F., 2004. Karatepe Bazaltlarının (Çorlu-Tekirdağ) Yapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği. İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, 17 (2), 69-74.
- ASTM C 295. Petrographic Examination of Aggregates for Concrete. 1990.
- Atasoy, K., 2003. Kula (Manisa) Yöresi Bazaltlı Cürufularının Çatı İzolasyon Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi. 180 s.
- Büyüksağış, İ.S., Gürcan, S., 2005. ASTM ve TSE doğal taş standartlarının karşılaştırılması. Madencilik, 44 (1), 33-41.
- CIRIA & CUR., 1991. Manual of the use of rock in coastal and shoreline engineering: CIRIA Special Publication v.83/CUR Report 154, CIRIA (Construction Industry Research and Information Association)/CUR, London.
- Çağlayan, M., Haberveren, S., İpekoğlu, B., Kurşun, İ., 1999. Beton Yapımında Kullanılan Agregaların Özellikleri ve Örnek Bir Kuruluş. "İSTON". 2. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, s.69-79.
- Çeliktaş, B.G., Kadioğlu, Y.K., Fener, M., Deniz, K., 2017. Volkanik Kökenli Kayaların Yapı Taşı Olarak Kullanılabilirliği: Ankara Civarı Volkanik Kaya Örnekleri. MERSEM (13-15 Aralık 2017), Antalya, s.515-524.
- Çokça, E., 2002. Relationship Between Methylene Blue Value, Initial Soil Suction and Swell Percent of Expansive Soils. Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Turkish J. Eng. Env. Sci., 26, 521-529.
- Çıyrak, N., 2010. Bergama Kozak Granit Alanının Doğal Radyasyon Seviyesinin Belirlenmesi ve Karasal Doz Hızının Tayin Edilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 63s. (Koralay vd., 2017)'den alıntılanmıştır.
- Deniz, K., Kadioğlu, Y.K., 2012. Lössit ve Pseudolössit İçeren Bazaltların Kökeni ve İç Anadolu'daki Önemi: Çiçekdağ, Kırşehir, Türkiye, Uluslararası Katılımlı V. Ulusal Jeokimya Sempozyumu Bildiri Özleri Kitabı, 128-129, 2012.
- Deniz, K., Kadioğlu, Y.K., Koralay, T., 2017. Bazaltların Yapıtışı Olarak Kullanılabilirliğinin Konfokal Raman Spektroskopisi (KRS) ile İncelenmesi: Çiçekhane Tepe Bazaltı, Kırşehir, İç Anadolu. MERSEM (13-15 Aralık 2017), Antalya, s.503-514.
- Dere, B., Miller, N., 1966. Tek Eksenli Basınç Direncine Göre Kayaların Sınıflandırılması. Ankara MTA Rapor No: 2352, 32.
- DPT, 2001. (Devlet Planlama Teşkilatı), Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyon Raporu (Mermer-Granit-Yapıtaşları-Arduaz), Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri II Çalışma Grubu Raporu, DPT:2616 ÖİK:627, Ankara, 2001, 191 s.
- Erkan, Y., 2013. Magmatik Petrografi, 2013. Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, yayın no. 93, yeniden düzenlenen 7. baskı, 175 s., Ankara.
- Google Map, 2018. Çalışma alanı ve çevresinin görüntüsü (Erişim Tarihi: 03.07.2018)
- Gökalp, İ., Uz, V.E., Saltan, M., 2016. Testing the abrasion resistance of aggregates including by-products by using Micro Deval apparatus with different standard test methods. Construction and Building Materials, 123, 1-7.
- Gökalp, İ., Uz, V.E., Saltan, M., Tutumluer, E., 2018. Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications. Transportation Geotechnics, 14, 61-69.
- Gökalp, İ., Uz, V.E., 2020. The effect of aggregate type and gradation on fragmentation resistance performance: Testing and evaluation based on different standard test methods. Transportation Geotechnics, 22, 100300.
- Halifeoğlu, M., Dalkılıç, N., 2002. Tarihten Günümüze Diyarbakır Bazaltının Gelişim Süreci ve Bugünkü Kullanım Alanları. I. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi, 9-13 Ekim, 570-579.
- Karadağ, A., 2008. Farklı Kökenli Agregalar İçeren Yüksek Mukavemetli Betonların Elastik Özelliklerinin İncelenmesi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (Yıldırım, H.- Tez Danışmanı).
- Kuşoğlu, R., Kabakcı, B., Kadioğlu, Y.K., 2012. Kaya yünü özelliği taşıyan bazaltların jeokimyasal özelliği ve Türkiye'den örnekler. Uluslararası Katılımlı 5. Jeokimya Sempozyumu, 23-25 Mayıs 2012, s.209-210, Denizli.
- Kahraman, E., Kılıç, A.M., 2016. Agregada Madenciliğinin Hazır Beton Üretimindeki Yeri. 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, 13-14 Ekim 2016, s. 324-329.
- Karaca, A., 2004. Post-Miocene deformation of an area between Alibey (Kızılcahamam) and Karalar (Kazan) villages, NW Ankara (Turkey), Msc. Thesis, METU.
- Keller, J., Jung, D., Eckhardt, F.J., Kreuzer, H., 1992. Radiometric Ages And Chemical Characterization Of The Galatean Andesite Massif, Pontus, Turkey, Acta Vulcanologica, Marinelli, 2, 267-276.
- Kaygısız, H., 2010. Kayseri Yöresindeki Yapıtaşlarının Fiziko-Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

- Keskin, Ö., Kılıç, A., 2003. Doğu Akdeniz Yöresi Bazaltlarının Kırmataş Olarak Değerlendirilme Olanakları. III. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, s.152-157, Adana.
- KGM, 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 (Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler). T.C. Ulaştırma Bakanlığı, Demiryolları, Limanlar, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü, Kıyı Yapıları ve Limanlar Malzeme, Yapım, Kontrol ve Bakım Onarım Teknik Esasları (DLH), Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) 2013. Erişim: <https://www.tam Yol.com.tr/UserFiles/Content/KGM_Teknik_Sartnamesi_2013.pdf>
- Kılıç, A.M., Sakatoğlu S., Kahraman, E., Yılmaz, M., 2015. Adana İli Taş (Kalker) İşletmelerinde Üretilen Agreganın İl Açısından Önemi. TMMOB, Adana Kent Sorunları Sempozyumu-III, Adana, Türkiye, 22-23 Mayıs 2015, ss.561-574.
- Kibici, Y., Dinç, D., Uçar, A., 2012. Afyonkarahisar Yöresi volkanik kayaçlarının minerolojik ve petrografik özellikleri. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 29, 53-70.
- Koçak, E., 2011. Kayseri bazaltının yapı taşı olarak kullanım olanaklarının araştırılması. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, s.76.
- Koralay, T., Çobanoğlu, İ., Demir, M., 2014. Ofiyolitler içerisindeki gabro dayaklarının balast malzemesi olarak kullanılabilirliği: (Bozkurt-Denizli) örneği. KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17 (2), 32-48.
- Koralay, T., Maden, N., Deniz, K., Kadıoğlu, Y.A., 2017. Dekoratif Amaçlı Kullanılan Bazı Magmatik-Metamorfik Kökenli Doğal Taşların Mineralojik, Petrografik Özellikleri ve Doğal Radyasyon Seviyelerinin Belirlenmesi MERSEM (13-15 Aralık 2017), Antalya, s.239-247.
- Korkanç, M., Tuğrul, A., 2003. Niğde yöresi bazaltlarının beton agregası olarak kullanılabilirliği. 3. Ulusal Kırmataş Sempozyumu (3-4 Aralık 2003), İstanbul, s.99-106.
- Korkanç, M., Tuğrul, A., 2006. Niğde yöresi bazaltlarının agrega kaynağı olarak değerlendirilmesi. 4. Ulusal Kırmataş Sempozyumu (1-2 Aralık 2006), İstanbul, s.93-100.
- Korkanç, M., Tuğrul, A., 2017. Niğde bölgesi agrega kaynakları ve sorunları. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6 (1), 122-131.
- Kulaksız, S., 2007. Doğaltaş (Mermer) Maden İşletmeciliği ve İşleme Teknolojileri, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 1. Baskı, Ankara.
- Kulaksız, S., 2007. Aksaray-Nevşehir-Karaman Bölgesi Bazaltik Cürufaların Doğal Yalıtım Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi, 6. Uluslararası Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu TMMOB Maden Müh. Odası Bildiriler Kitabı.
- Kulaksız, S., 2017. Türkiye Bazaltlarının Endüstriyel Kayaç Olarak Kullanımı ve Değerlendirmesi. MERSEM (13-15 Aralık 2017), Antalya, s.609-616.
- Kulaksız, S., Bayhan, H., Ayder, E., 2006. Aksaray-Nevşehir Karaman Bölgesi Bazaltik Cürufaların İncelenmesi. Hacettepe Üniversitesi Araştırma ve Geliştirme Fonu, Yayınlanmamış Rapor, 50 s.
- Mercan Madencilik, 2018. Erişim tarihi: 01.03.2018, <<http://www.mercanmadencilik.com/>>
- Önem, Y., 1997. Sanayi Madenleri. Kozan Ofset Matbaacılık San. Ve Tic. Ltd. Şti. ISBN 975-96255-0-4, Ankara, 308 s.
- Özturan, T., Çeçen, C., 1997. "Effect of Coarse Aggregate Type on Mechanical Properties of Concretes With Different Strengths", Cement and Concrete Research, 27 (2), 165-170.
- Öztürk, C.A., Nasuf, E., Fişne, A., Erkan, M., 2003. Türkiye ve dünyada agrega organizasyonları ve işlevleri. III. Ulusal Kırmataş Sempozyumu (3-4 Aralık 2003). İstanbul, s.317-325.
- Parnas, R., Shaw, M., Liu, Q., 2007. Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites. The New England Transportation Consortium, August, Project No. 03-7.
- Patnaik, A., 2009. Applications of Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) Reinforcement for Transportation Infrastructure, Developing a Research Agenda for Transportation Infrastructure, p.1-5.
- Sheldon, G.L., Forming Fibres from Basalt Rock-New Application For A Well-Established Process, Platinum Metal Rev., 1977; 21(1), 18-24.
- Sür, A., Sür, Ö., Yiğitbaşıoğlu H., 2001. Mineraller ve kayaçlar, Bilim Yayıncılık, Ankara.
- Tankut, A., Güleç, N., Wilson, M., Toprak, V., Savaşçın, Y., Akıman, O., 1998. Alkali Basalts From the Galatia Volcanic Complex, NW Central Anatolia, Turkey., Tr. J. of Earth Sciences, 7, 269-274.
- Tarhan, F., 1989. Mühendislik jeolojisi prensipleri. Genel Yayın No:145, KTÜ, Trabzon.
- Tasong, W.S., Lynsdale, C.J., Cripps, J.C., 1998. Aggregate-Cement Paste Interface II: Influence of Aggregate Physical Properties. Cement and Concrete Research, 28 (10), 1453-1465.
- Taşdemir, C., 2016. Agregata Tür ve Boyutunun Betonun Dayanımına ve Donma - Çözülme Direncine Etkileri. Agregata Bülteni, 3, 6-12.
- Topçu, İ.B., Demir, A., 2006. Metilen mavisi deneyi ile ince tanelerdeki kil içeriğinin belirlenmesi. 4. Ulusal Kırmataş Sempozyumu (1-2 Aralık 2006), İstanbul, s. 299-304.
- Toprak, V., Savaşçın, Y., Güleç, N., Tankut, A., 1996. Structure of the Galatean Volcanic Province, Turkey , International Geology Review, 38, 8, 747-758.
- Toygır Sağın, Ö., Karaoğlu, Ö., 2018. Galatya Volkanik Provensi'nin Doğu Kesiminin Volkanolojik Evrimi: Ön Bulgular. 71. Türkiye Jeoloji Kurultayı (23-27 Nisan 2018), Ankara, 543-544.
- Türkecan, A., Hepşen, N., Papak, İ., Dinçel, A., Akbaş, B., Bedi, Y., Karataş, S., Özgür, İ., B., Akay, E., Sevin, M., Mutlu, G., Sevin, D., Ünay, E., Saraç, G., 1991. Seben - Gerede (Bolu) - Güdül - Beypazarı (Ankara) ve Çerkeş - Orta-Kurşunlu (Çankırı) Yörelerinin (Köroğlu dağları) Jeolojisi ve Volkanik Kayaçların Petrolojisi. M.T.A. raporu no: 9193, 118 s., Ankara.
- TS 2513, 1977. Doğal Yapı Taşları. (İptal standart), TSE, Ankara.
- TS 7043, 2004. Demiryolu balastları için agregalar. TS 7043 EN 13450, TSE, Ankara.
- TS EN 1367-2, 1999. Agregaların Termal ve Bozunma Özellikleri için Deneyler Bölüm 2: Magnezyum Sülfat Deneyi. (İptal standart), TSE, Ankara.
- TS EN 933-9, 2001. İnce Tanelerin Tayini Metilen Mavisi Deneyi. TSE, Ankara.
- TS 699 T1, 2009. Doğal Yapı Taşları - İnceleme ve Laboratuvar Deney Yöntemleri. TSE, Ankara, 2009.
- TS EN 1097-6, 2013. Agregaların Mekanik Ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun Ve Su Emme Oranının Tayini. TSE, Ankara.

- TS EN 13383- 1, 2013. Koruma Tabakası Taşları (Zırh Taşı) Bölüm 1: Özellikler. TSE, Ankara.
- TS EN 13383-2, 2013. Koruma Tabakası Taşları (Zırh taşı) - Bölüm 2: Deneysel Metotları. TSE, Ankara.
- TS EN 206, 2014. Beton - Özellik, Performans, İmalât ve Uygunluk. TSE, Ankara.
- TS EN 1910, 2016. Ahşap ve Parke Yer Döşemeleri ve iç ve Dış Ahşap Kaplamalar-Boyutsal Kararlılığın Belirlenmesi. TSE, Ankara.
- UNSCEAR, 2000. Report, United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiations, United Nations, New York. (Koralay vd., 2017)'den alıntılanmıştır.
- Uyanık, N.A., Akkurt, İ., 2009. Alkali Volkanitler Yönünden Zengin Olan Isparta-Çünür Tepesinde Doğal Radyoaktivite Tayini. AKÜ Fen Bilimleri Dergisi, 2, 35-42.
- Uz, B., 1990. Ülkemizde Sert Mermer Grubu Serpantin-Ultrabazikler, Mermer Dergisi, Nisan sayısı, 25-27.
- Uz, B., 1999. Bazaltların Kırmataş Yönünden Değerlendirilmesi Trakya - Tekirdağ Bölgesi Bazaltları Örneği. 2. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, İstanbul, s.1-12.
- Uz, V.E., Gökalp, İ., 2017. The effect of aggregate type, size and polishing levels to skid resistance of chip seals. Materials and Structures, 50 (2), 1-14.
- Uz, B., Esenli, V., Yavuz, O., Manav, H., Bacak, G., 2001. Sert Mermer Grubuna Bir Örnek; Karacadağ (Diyarbakır) Bazaltlarının 'Mermer' Açısından İncelenmesi. Türkiye III. Mermer Sempozyumu (MERSEM 2001) Bildiri Kitabı, Afyon, s.9-15.
- Wilson, M., Tankut, A., Güleç, N., 1997. Tertiary volcanism of the Galatia province, north-west Central Anatolia, Turkey, Lithos, 42, 105-121.
- Wincshester, J.A., Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20, 325-343.
- Yaprak, G., 2009. Çevresel Radyoaktivite I ve II Ders Notları (yayınlanmamış), E.Ü. Nükleer Bilimler Enstitüsü. (Koralay vd., 2017)'den alıntılanmıştır.
- Yaşar, E., Erdoğan Y., 2001. Toprakale Bazaltının Doğal Taş Endüstrisindeki Yeri, 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Ç.Ü., s. 87-96.
- Yıldırım, H., 2017. Demiryolu Balast Agregaları Değerlendirme. Yayınlanmamış çalışma.
- Yıldırım, H., Karadağ, A., Atahan, 2008. Effect of aggregate type on modulus of elasticity of high strength self consolidating concretes. Scc2008 Chicago, The Third North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, H.N. pp.482-488.
- Yıldız, T.D., 2019. The share of required costs in investment amounts for mining operating activities in pasture lands in Turkey. Journal of Engineering Science of Adıyaman University, 6 (10), 23-31.
- Yıldız, T.D., Uz, B., Ülgen, S., Uz, V., Coşkun, N.H., Uçar, A., Kayıkçı, S., 2020. Bursa - Akçapınar - Kazanpınar civarında kireçtaşı kökenli mermer oluşumlarının etüt ve değerlendirilmesi. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7 (13), 56-74.
- Yool, A.I.G., Lees, T.P., Fried, A., 1998. Improvements to the Methylene Blue Dye Test for Harmful Clay in Aggregates for Concrete and Mortar. Cement and Concrete Research, 28 (10), 1417-1428.
- Yüksel Proje, 2007. T.C. Ulaştırma Bakanlığı Demiryollar, Limanlar, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü Kıyı Yapıları Ve Limanlar Malzeme, Yapım, Kontrol Ve Bakım Onarım Teknik Esasları. Ankara. Erişim: <<https://aygm.uab.gov.tr/uploads/pages/kiyi-yapilari-deprem-teknik-sartnameleri/2.pdf>>
- Yürür, M.T., Temel, A., Köse, O., 2002. Galatya Volkanik Bölgesinin (KB İç Anadolu, Türkiye) Güney Sınırında Kabuk Açılmasına Ait Veriler. Türkiye Jeoloji Bülteni, 45 (1), 85-98.
- Yüzer, E., 2008. Doğal taş deyince. Granitaş, Taş Kültürü Yayını, ISBN: 978-9944-0619, 1.baskı, İstanbul.
- Yüzer, E., Güngör, Y., Aydoğan, S., 2016. Doğal taşın öyküsü. Kare Tasarım Yayıncılık, ISBN: 978-605-63410-2-1, 1. baskı, İstanbul.



BUHAR KÜRÜNÜN UÇUCU KÜLLÜ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN KISA VE UZUN SÜRELİ BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ

Şirin KURBETCİ*

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Buhar Kürü, Kendiliğinden Yerleşen Beton, Uçucu Kül, Basınç Dayanımı.</i>	Bu çalışmada buhar kürünün farklı dozajlarda uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların kısa ve uzun süreli basınç dayanımı üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla çimento ağırlığının %0, %20, %30, %40 ve %50' si oranında uçucu kül ikame edilen 500 kg/m ³ , 550 kg/m ³ ve 600 kg/m ³ dozajlı kendiliğinden yerleşen betonların buhar kürü sonrası 1 gün, 28 gün ve 180 günlük basınç dayanımları standart kür gören betonlarla karşılaştırılmıştır. Buhar kürünün 1 günde sağladığı dayanım kazancı uçucu kül ikame oranı arttıkça artarak %24-93 arasında olmuştur. 28 günlük basınç dayanım oranları ise uçucu kül ikame oranı arttıkça artmış, buhar kürü etkisiyle oluşan dayanım kayıpları %13 ile %6 arasında değişmiştir. İleri yaşta ise uçucu kül ikame oranı arttıkça buhar kürlü ve standart kürlü dayanımlar arasındaki fark büyümüştür.

EFFECT OF STEAM CURING ON SHORT AND LONG-TERM COMPRESSIVE STRENGTH OF SELF-COMPACTING CONCRETE WITH FLY ASH

Keywords	Abstract
<i>Steam Curing, Self-Compacting Concrete, Fly Ash, Compressive Strength.</i>	In this study, the effect of steam curing on the short and long-term compressive strength of self-compacting concrete containing fly ash was investigated. For this purpose, steam curing was applied to self-compacting concrete with dosages of 500 kg/m ³ , 550 kg/m ³ and 600 kg/m ³ in which fly ash was substituted at ratios of 0%, 20%, 30%, 40% and 50% of the cement weight and 1 day, 28-day and 180-day compressive strengths were compared with standard cured concrete. The strength gain of steam cured concrete in 1 day increased as the fly ash replacement ratio increased in level of 24-93%. The ratio of 1-day steam-cured concrete strengths to the 28-day compressive strength increased as the fly ash replacement ratio increased, and strength losses due to steam curing varied between 13% and 6%. In later ages, the difference between steam cured and standard cured strengths increased as the fly ash replacement ratio increased.

Alıntı / Cite

Kurbetci, Ş., (2022). Buhar Kürünün Uçucu Küllü Kendiliğinden Yerleşen Betonların Kısa ve Uzun Süreli Basınç Dayanımına Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 28-37.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ş. Kurbetci, 0000-0002-2000-571X

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	15.06.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	15.09.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	03.11.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Kendiliğinden yerleşen beton, kendi ağırlığı etkisinde, ayrışma ve terleme oluşmadan kalıba yerleşebilen bir beton türüdür (Cengiz vd., 2020). Prefabrik beton tesislerinde kendiliğinden yerleşen betonun kullanımı, işçilik ve ekipman maliyetlerinin azaltılması, verimliliğin artırılması, karmaşık kalıpların doldurulmasında kolaylık sağlanması, yoğun donatılı bölgelerde boşluksuz yerleşme sağlanması, şantiyedeki gürültünün azaltılması ve üstün yüzey kalitesine sahip olması gibi avantajlarından dolayı artmaktadır (Ramezaniyanpour vd., 2013). Kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) düşük S/Ç oranı, yüksek bağlayıcı miktarı ve boşluksuz yerleşmesi nedeniyle dış etkilere dayanıklı oluşu da tercih nedenlerindedir. KYB'nin malzeme türü ve miktarındaki değişiklik reolojiyi ve dizaynı önemli derecede değiştirdiği için üretim koşullarının çok hassas olması nedeniyle çok kontrollü olarak üretilip uygulanmalıdır. Dolayısıyla bu nedenle de prefabrikasyon için çok uygun bir beton türüdür.

KYB, bileşenlerinin bileşimine ve özelliklerine büyük ölçüde bağımlı olan hassas bir karışım olmanın yanında ayrışmaya karşı yüksek direnç ile yüksek akışkanlık gibi zıt özelliklere de sahip bir betondur. Dezavantajlarından biri de yüksek maliyetidir. KYB'nin maliyetini düşürmenin bir alternatifi, portland çimentosunun bir kısmının yerini alan mineral katkıların kullanılmasıdır. Kireçtaşı tozu, mermer tozu, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolin kullanımının KYB üzerindeki etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Felekoglu, 2007; Bosiljkov vd., 2010; Uysal ve Yılmaz, 2011; Uysal ve Mansur, 2011; Vejmelkova vd., 2011). Bu ince malzemeler ince tanelerin granülometrisini iyileştirir, böylece taze halde daha iyi bir kohezyon sağlarlar. Sertleşmiş durumda da betonun mikro yapısını önemli ölçüde iyileştirir ve betondaki birbirine bağlı kılcal gözenekleri azaltırlar (Derabla ve Benmalek, 2014).

Prefabrik beton tesislerinde, kullanılan teçhizatın mümkün olduğunca çabuk serbest kalması, depolama alanlarının uzun süre işgal edilmemesi gibi gereklilikler vardır. Taze betonun hazırlanması ve beton ürünlerin kalıptan çıkarılması arasındaki sürenin azaltılması, kullanılan ekipmanın mümkün olduğunca çabuk serbest kalması için önemli bir faktördür ve toplam üretim maliyetini düşürür. Bu da betonun dayanım gelişiminin hızlandırılması ile gerçekleşebilir (Higginson, 1961). Geleneksel bileşenler ve uygun katkıları içeren KYB karışımına optimize edilmiş bir ısı işlem uygulanması, birkaç saatlik bir işlemde sonra önemli bir basınç dayanımına ulaşan ve sertleşmiş betonun dayanım kaybının en aza indirilmesine izin veren bir beton üretmeyi mümkün kılar (Ardahanlı vd., 2021; Tuyan, 2019). Prefabrikasyonda kullanılan erken dayanım kazandırma yöntemi buhar kürüdür. Atmosferik buhar kürü, beton ürünlerin mukavemet gelişimini hızlandırmak için uzun yıllardır kullanılan bir ısı işlemidir. Sıcaklığın artması ile çimentonun hidrasyon hızı artar, bu nedenle betonun buharla kürlenmesi ile mukavemet kazanımı hızlandırılır (Türkel ve Alabaş, 2005). Uzun süre ısı işlem görmüş betonun erken yaşlardaki basınç dayanımı kazancı, karışımın bileşiminden ve işlem sürecinin parametrelerinden etkilenir (Hwang vd., 2012). Fakat yüksek sıcaklığın priz hızlandırıcı etkisinden yararlanan betonlarda, beton türü ve bileşenlerine bağlı olarak ileri yaşta betonun bazı zararlar gördüğü, bu zararların da betonu dış etkilere dayanıksız hale getirebileceği bilinmektedir.

Buhar kürünün, üretiminde çeşitli mineral katkıları kullanılan KYB'ye uygulanabilirliği ve buhar kürünün mineral katkılarıyla uyumu üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Derabla ve Benmalek mineral katılı KYB' ler üzerinde buhar kürünün kısa ve uzun vadedeki etkisini araştırdılar (Derabla ve Benmalek, 2014). 60 °C de 24 saat ısı işlem uygulamasının uzun vadede en az kayıp oluşturan çevrim parametreleri olduğunu belirttiler. Calvo ve arkadaşları prekast ürünlerde KYB'ye ısı işlem uygulamasının dayanıklılık performansını incelediler (Calvo vd., 2016). Isıl işlem uygulamasının, %20 oranında filler ile ikame ederek ürettikleri KYB nin durabilitesine çok önemli bir olumsuz etki yapmadığını belirttiler. Isıl işlem uygulanmış betonlarda nihai dayanımın beklendiği gibi azaldığını, kılcallık katsayısının arttığını, toplam porozitenin arttığını, gözenek boyutu dağılımının değiştiğini ve C-S-H jellerinde değişiklikler oluştuğunu söylediler. Reinhardt ve Stegmaier, ısı işlemin KYB'lerin basınç dayanımı ve gözenek boyutu dağılımı üzerindeki etkisini araştırdılar (Reinhardt ve Stegmaier, 2006). KYB'lere ısı işlem uygulamasının gözeneklerin toplam hacmini artırmadan daha kaba gözenek boyutu dağılımına yol açtığını ve daha büyük gözeneklerin miktarının, işlem sıcaklığı ile arttığı sonucuna vardılar. Ramezianpour ve arkadaşları farklı tipte mineral katılı KYB'ler üreterek buhar kürü uyguladılar ve mekanik özelliklere ve durabiliteye etkisini araştırdılar (Ramezianpour vd., 2013). Mineral katkıların durabiliteyi iyileştirdiğini ve yüksek sıcaklıkta buhar kürünün basınç dayanımını arttırdığını fakat durabiliteye olumsuz etki yaptığını belirttiler. Başka bir çalışmada ise 36 farklı buhar kürü çevrimi uyguladıkları KYB'lerin durabilite özelliklerini araştırdılar (Ramezianpour vd., 2014). 70 °C işlem sıcaklığının durabilite üzerinde olumsuz etki yaptığını, çünkü C-S-H jelinin ve CH'in hızlı oluşumları nedeniyle heterojen ve daha büyük boşluklu olduğunu söyleyerek en uygun kür çevrimini 3 saat ön bekleme, 60 °C işlem sıcaklığı ve 10 saat toplam kür süresi olarak önerdiler. Bingöl ve Tohumcu, uçucu kül ikame ederek ürettikleri KYB'lere çeşitli buhar kürü çevrimleri uyguladılar ve uçucu kül ikame miktarındaki artışın, basınç dayanımının azalmasına neden olduğunu, standart kür görmüş betonlara göre en yüksek basınç dayanımı oranının 16 saatlik kür süresi boyunca 70 °C'de %55 uçucu kül ikamesi ile standart kürlenmiş numunelerin %95'i olduğunu belirttiler (Bingöl ve Tohumcu, 2013). Zhimin ve arkadaşları mineral katkıların buhar kürlü betonun kısa ve uzun süreli performansına etkisini araştırdılar. Genel olarak mineral katkıların performansı iyileştirdiğini, uçucu külün olumlu etkisinin uzun sürede ortaya çıktığını, granüle yüksek fırın cürufu ile uçucu kül birlikte kullanıldığında yüksek sıcaklığın bu mineral katkıların reaktivitesini iyileştirdiğini ve dolayısıyla betonun transport özelliklerini iyileştirdiğini söylediler (Zhimin vd., 2012). Maltais ve Marchand uçucu külün erken yaşta çimento hidrasyon oranını önemli ölçüde artırma eğiliminde olduğunu belirterek, kürlenme sıcaklığındaki bir yükselmenin referans harcın uzun vadeli basınç dayanımını azalttığını, bunun tersine uçucu kül karışımlarının uzun vadeli basınç dayanımı üzerinde hiçbir zararlı etkisi olmadığını gözlemlediler (Maltais ve Marchand, 1997). Liu ve arkadaşları, buharla kürlenmiş ultra ince uçucu kül içeren betonun 13 saatlik buhar küründen sonra çok düşük erken dayanıma sahip olduğu ve bu beton ile standart kür gören betonun 28 günlük basınç dayanımı arasında büyük fark olduğunu belirtmişlerdir (Liu vd., 2005). Uçucu külün reaktivitesini etkinleştirmek için kimyasal aktivatörler kullanılması ile erken dayanımın arttığını gözlemişlerdir. Yazıcı vd. buhar kürünün, yüksek hacimli uçucu kül beton karışımlarının 1 günlük mukavemet

değerlerini (%40, %50 ve %60 uçucu kül ikamesinde) yaklaşık 10 MPa'dan 20 MPa'a çıkardığını, bunun da prefabrik beton endüstrisi için yeterli olduğunu söylemişlerdir (Yazıcı vd., 2005). Bununla birlikte, buhar kürü uygulanmış uçucu küllü betonun nihai basınç dayanımının, standart kürlenmiş betonunkinden çok daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı buhar kürünün farklı dozajlarda uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların kısa ve uzun süreli basınç dayanımı üzerine etkisinin araştırılmasıdır. Bu amaçla çimento ağırlığının %0, %20, %30, %40 ve %50' si oranında uçucu kül ikame edilen 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlı kendiliğinden yerleşen betonların buhar kürü sonrası 1 gün, 28 gün ve 180 günlük basınç dayanımları standart kür gören betonlarla karşılaştırılmıştır.

2. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

2.1. Malzemeler (Materials)

Çalışmada Aşkale Çimento Fabrikası üretimi CEM I 42.5R çimentosu kullanılmıştır. Uçucu kül ise Sugözü termik santralinden elde edilen F sınıfı uçucu küldür. Çimento ve Uçucu küle ait bazı fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Çimento ve Uçucu Küle Ait Bazı Özellikler (Some Properties of Portland Cement And Fly Ash)

Kimyasal özellikler, %	Çimento	UK	Fiziksel özellikler	Çimento	UK
CaO	64,33	3,36	45µm elek üstü (%)	7,84	16,1
SiO ₂	18,62	58,75	Özgül ağırlık (gr/cm ³)	3,13	2,32
Al ₂ O ₃	4,51	29,17	Özgül yüzey (cm ² /gr)	3616	3050
Fe ₂ O ₃	2,95		Priz başı (dk)	143	
MgO	2,09	1,45	Priz sonu (dk)	182	
SO ₃	2,77	0,15	Hacim genişmesi (mm)	1	
Na ₂ O	0,25		Normal kıvam (%)	28,8	
K ₂ O	0,62		Mekanik Özellikler		
Cl	0,0191	0,002	Basınç dayanımı (MPa) 2 gün	25,1	
Serbest CaO	0,62				
Çözünmeyen kalıntı	0,7	87,56	Basınç dayanımı (MPa) 28 gün	52,8	
Kızdırma kaybı	3,46	1,37			

Üretimlerde kullanılan agregalar kırma agrega ve doğal kumdur. Kullanılan doğal kumun ve kırma agreganın max. tane çapları sırasıyla 8 mm ve 16 mm'dir. Agregalar ile ilgili bazı fiziksel özellikler Tablo 2.'de verilmiştir. Kullanılan agregaların ve karışım agregasının granülometreleri Tablo 3.'de verilmiştir. Karışım agregası %60 doğal kum, %40 kırma agrega kullanılarak oluşturulmuştur.

KYB üretiminde polikarboksilik eter içeren hiperakışkanlaştırıcı bir katkı kullanılmıştır.

Tablo 2. Agregaların Bazı Fiziksel Özellikleri (Some Physical Properties of Aggregates)

	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)
Doğal Kum	2.58	3
Kırmataş	2.62	2

Tablo 3. Kullanılan Agregalara Ait Granülometri Değerleri (The Gradations of The Used Aggregates)

Elekt açıklığı, mm	Geçen, %					
	16	8	4	2	1	0,25
Doğal Kum	100.0	100.0	92.0	76.0	60.0	6.0
Kırmataş	100.0	70.0	32.0	0.0	0.0	0.0
Karışım agregası	100.0	88.0	68.0	45.6	36.0	3.6

Deneysel çalışma üç farklı toplam bağlayıcı miktarında (500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³) kendiliğinden yerleşen betonlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm betonlarda Su/Bağlayıcı oranı 0.35 değerinde sabit tutulmuştur. Su indirgeyici katkı, (çimento + uçucu kül) miktarının %1.5'i oranında kullanılmıştır. Her toplam bağlayıcı miktarı için, uçucu külsüz ve çimento ağırlığının %20, %30, %40 ve %50' si oranında uçucu kül ile ikame edilerek toplam 15 üretim gerçekleştirilmiştir. Her üretimde 18 adet 15 cm küp numune üretilmiştir. Numunelerin 9 tanesine buhar kürü, 9 tanesine su kürü uygulanmış; 1, 28 ve 180 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Üretilen betonların bileşimleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Beton Bileşimleri (Concrete Mix Proportions)

KOD	Ç (kg/m ³)	UK (kg/m ³)	S (kg/m ³)	Doğal Kum (kg/m ³)	Kırmataş (kg/m ³)		
					8-16 mm	4-8 mm	2-4 mm
500UK00	500	0	175.0	988.0	196.0	248.0	210.0
500UK20	400	100		968.0	192.0	243.1	204.7
500UK30	350	150		957.5	189.9	240.5	202.5
500UK40	300	200		947.2	187.3	238.2	200.0
500UK50	250	250		936.7	185.7	235.3	198.1
550UK00	550	0	192.5	937.1	185.8	235.4	198.2
550UK20	440	110		914.2	181.0	229.3	193.1
550UK30	385	165		902.7	179.0	226.7	191.0
550UK40	330	220		891.2	176.7	223.9	188.5
550UK50	275	275		879.8	174.5	221.0	186.1
600UK00	600	0	210.0	885.4	175.6	222.4	187.3
600UK20	480	120		860.4	170.6	216.1	182.0
600UK30	420	180		847.9	168.1	213.0	179.3
600UK40	360	240		835.4	165.7	209.8	176.7
600UK50	300	300		823.2	163.2	176.7	174.0

Ç: Çimento, UK: Uçucu kül, S: Su

2.2.1. Taze Beton Deneyleri (Fresh Concrete Tests)

Taze betonlar üzerinde çökme yayılma deneyi yapılarak yayılma çapı ve T50 süresi ölçülmüştür. Geçiş özelliği ise V hunisi deneyi ile belirlenmiştir. Deneylerin yapılına ait görseller Şekil 1.'de verilmiştir.



Şekil 1. Çökme Yayılma ve V Hunisi Deneylerinin Yapılışı (Slump Flow And V-Funnel Tests)

2.2.2. Buhar Kürü Çevrimi (Steam Curing Cycle)

Tipik bir buhar kürü çevrimi, numunelerin üretiminden sonra 2-4 saatlik ön bekleme periyodu, 11-44 °C /s' lik bir ısıtma ve soğutma hızı ve 6-18 saatlik sabit sıcaklıkta bir işlem periyodundan oluşur. Buhar küründe maksimum işlem sıcaklığı genellikle 60-90 °C ile sınırlıdır. Gecikmiş etrenjit oluşumu riski nedeniyle bu sıcaklığının 65 °C'yi aşmaması önerilmektedir (Hwang vd., 2012). Bu çalışmada uygulanan kür çevrimi Şekil 2'de görüldüğü gibi 4 saat ön bekleme, 4 saat ısıtma, 65 °C' de 11 saat işlem, 4 saat soğuma ve 1 saat son bekleme şeklinde toplam 24 saat süren yumuşak bir çevrimdir. Üretilen betonlar kalıplara yerleştirildikten sonra buhar kürü uygulanacak numuneler laboratuvarında 20 °C sıcaklıkta üzerleri naylon örtü ile örtülerek 4 saat ön beklemenin ardından kür tankına yerleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan buhar kürü tankı Şekil 3' te görülmektedir.



Şekil 2. Buhar Kürü Çevrimi (Steam Curing Cycle)



Şekil 3. Deneylerde Kullanılan Buhar Kürü Tankı (Steam Curing Chamber Used in Experiments)

3. Deneysel Bulgular ve Yorum (Experimental Results and Discussion)

3.1. Taze Beton Özellikleri (Fresh Concrete Properties)

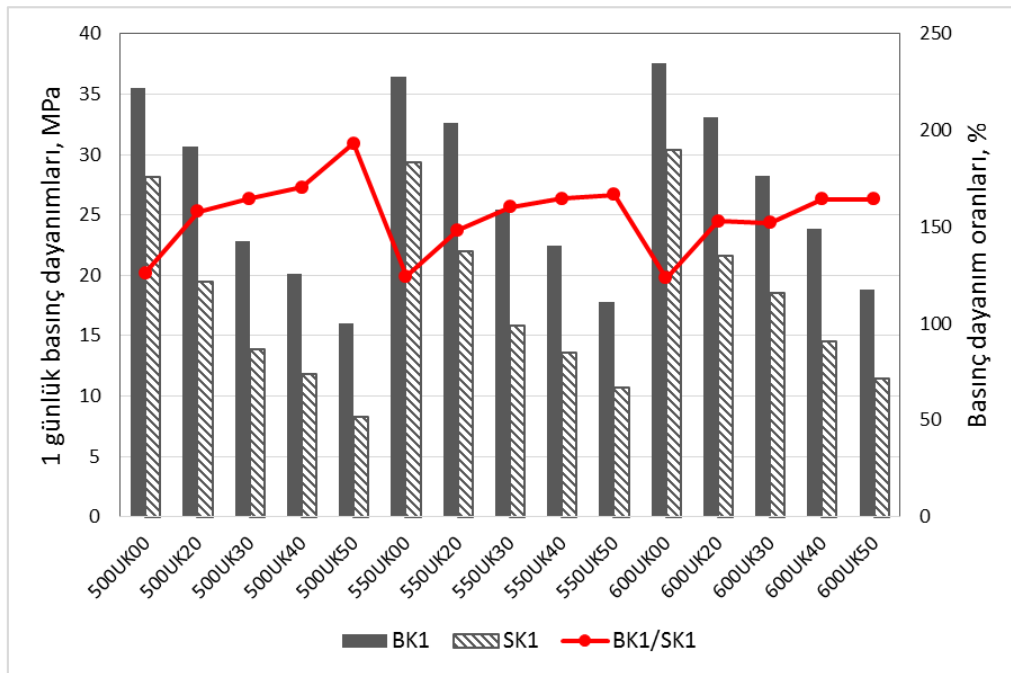
Üretilen betonların Abrams konisi ile belirlenen yayılma çapları, T50 süreleri ve V- hunisi akış süreleri Tablo 5'de görülmektedir. EFNARC kendiliğinden yerleşen betonlar için SF1 (550-650 mm), SF2 (660-750 mm) ve SF3 (760-850 mm) şeklinde üç çökme-yayılma sınıfı tanımlamıştır (Efnarc, 2002). Çalışmada üretilen betonların çökme-yayılma değerleri ise 63-78 cm arasında olmuştur ve EFNARC kriterlerine göre üç beton dışında tümü SF2 sınıfındadır. Toz malzeme miktarı arttıkça yayılma çapının arttığı görülmektedir. EFNARC kriterlerine uygun olarak tüm betonların T50 süreleri 2-5 sn arasında, V hunisi akış süreleri ise 6-12 sn arasında olmuştur.

Tablo 5. Taze Beton Özellikleri (Properties of Fresh Concretes)

KOD	Yayılcı çapı cm	T50 süresi sn	V hunisi sn
500UK00	63	5	11
500UK20	65	5	12
500UK30	67	3	7
500UK40	68	2	7
500UK50	78	3	8
550UK00	65	4	9
550UK20	67	3	8
550UK30	68	3	7
550UK40	68	3	7
550UK50	70	3	6
600UK00	68	2	6
600UK20	67	3	6
600UK30	69	2	6
600UK40	74	2	9
600UK50	78	2	8

3.2. Buhar Kürünün 1 Günlük Basınç Dayanımları Üzerindeki Etkisi (The Effect of Steam Curing on 1-Day Compressive Strengths)

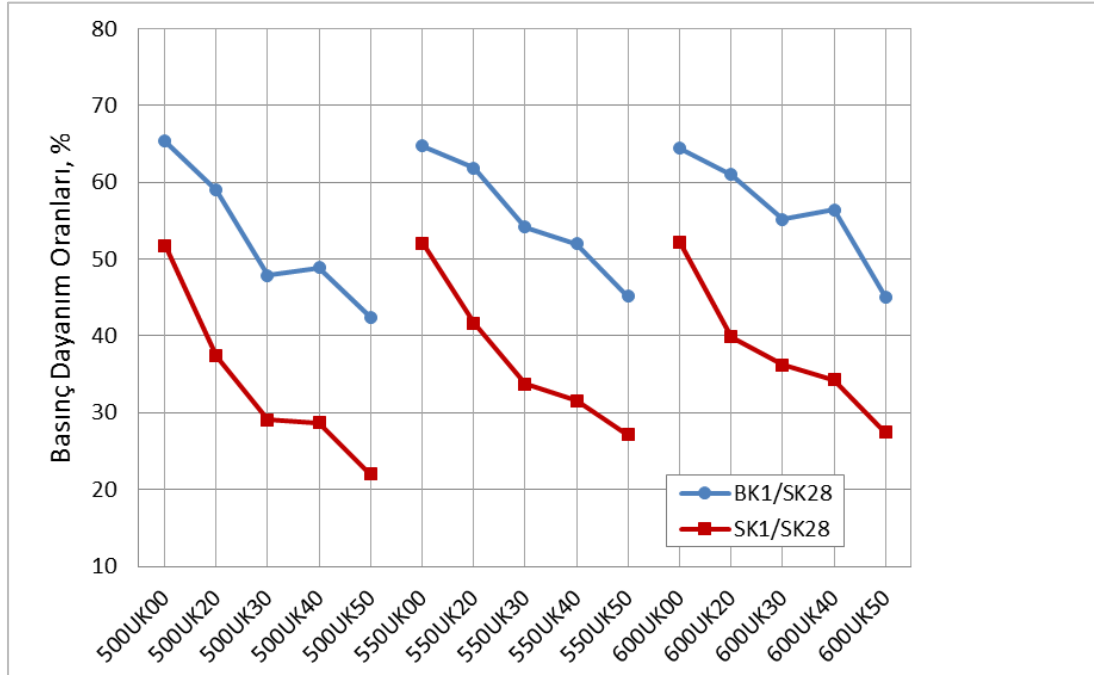
Şekil 4'de buhar kürü ve standart kür uygulanan numunelerin 1 günlük basınç dayanımları ve basınç dayanım oranları verilmiştir. Standart kürlü kontrol betonlarında (uçucu kül kullanılmayan) 1 günlük basınç dayanımları 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlar için sırasıyla 28.1 MPa, 29.3 MPa ve 30.4 MPa olurken, uçucu kül ikamesinin artmasıyla değerler azalmış, %50 uçucu kül ikameli betonlarda dayanımlar sırasıyla 8.3 MPa, 10.7 MPa ve 11.5 MPa değerine inmiştir. Buhar kürü uygulanan betonlarda ise kontrol betonlarının 1 günlük basınç dayanımları 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlar için sırasıyla 35.5 MPa, 36.5 MPa ve 37.6 MPa değerlerine ulaşırken %50 uçucu kül ikame edilen betonlarda dayanımlar aynı sıra ile 16.0 MPa, 17.8 MPa ve 18.8 MPa değerine düşmüştür. Yazıcı ve arkadaşları, prekast ürünlerin kalıp sökümü için 1 günlük basınç dayanımının 20 MPa olmasının yeterli olduğunu belirtmişlerdir (Yazıcı vd., 2005). Bu açıdan değerlendirildiğinde standart kür uygulanan numunelerden kontrol betonları dışında sadece 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozlu betonlarda %20 uçucu kül içerenlerin 20 MPa'yı aştığı görülmektedir. Buhar kürü uygulanan betonlarda ise %50 uçucu kül ikameli olanlar dışında tüm dayanımlar 20 MPa'nın üzerindedir. Buhar kürü uygulamasının standart küre kıyasla tüm betonlarda 1 günlük basınç dayanımını arttırmasının nedeni, nem ve yüksek sıcaklık etkisinde hidrasyon reaksiyonlarının hızlanması ve sertleşmiş betonun en önemli bağlayıcı fazı olan C-S-H jelinin hızlı oluşumudur (Richardson, 2004).



Şekil 4. 1 Günlük Basınç Dayanımları ve Basınç Dayanım Oranları (1-Day Compressive Strengths And Strength Ratios)

Şekil 4'de aynı zamanda buhar kürlü ve standart kürlü numunelerin 1 günlük basınç dayanım oranları görülmektedir. Görüldüğü gibi her üç bağlayıcı dozajında da uçucu kül kullanılmayan kontrol betonunda dayanım oranları hemen hemen eşit ve yaklaşık %25 düzeyinde olmuş, ikame oranı arttıkça dayanım kazancı da artmıştır. Dayanım oranları %50 uçucu kül ikameli betonlarda 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlar için sırasıyla %193, %167 ve %164 düzeyindedir. Bu durum buhar kürünün uçucu külün normalde yavaş gelişen dayanım gelişimini hızlandırdığının göstergesidir. Bu bulgu puzolanik katkıların ısı işlemlere yatkın olduğu görüşünü doğrular niteliktedir. Yazıcı ve Arel, %10, %20 ve %30 uçucu kül ikameli 450 kg/m³ dozajlı harçlar üzerinde yaptıkları çalışmada 65 °C de toplam 24 saat buhar kürü çevrimi sonunda uçucu kül ikamesi arttıkça %70'den %80'e artan dayanım kazançları gözlemlenildi ve uçucu küllü betonların buhar kürü altında kontrol harcına göre daha fazla dayanım kazanımının yüksek miktarda silis içermesi nedeniyle olduğunu belirttiler (Yazıcı ve Arel, 2016).

Buhar kürü uygulamasıyla betonun kazandığı erken dayanımın 28 günlük standart dayanıma ne kadar yaklaştığı da dayanım oranları ile belirlenmiştir. Şekil 5'te buhar kürlü ve standart kürlü betonların 1 günlük dayanımlarının 28 günlük standart dayanımlara oranları görülmektedir. Her üç dozajda da standart kür gören kontrol betonları 1 günde 28 günlük basınç dayanımının %52'sini kazanmıştır. Bu oran buhar kürü gören betonlarda her üç dozaj için % 65'e çıkmıştır. Uçucu kül ikame oranının artması ile dayanım oranları gittikçe azalmıştır. %50 uçucu kül ikamesi için buhar kürü gören betonlarda dayanım oranları 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlar için sırasıyla %42, %45 ve %45 olmuş, standart kür gören betonların oranları aynı sıra ile %22, %27 ve %27'ye inmiştir. Uçucu kül kullanılmayan betonlarda buhar kürü ve standart kürün dayanım oranları arasındaki fark %13 iken %50 uçucu kül ikameli betonlarda fark ortalama %19'a çıkmıştır. Uçucu kül ikame oranının artmasının buhar kürünün sağladığı dayanım kazancını arttırdığı burada da görülmektedir.



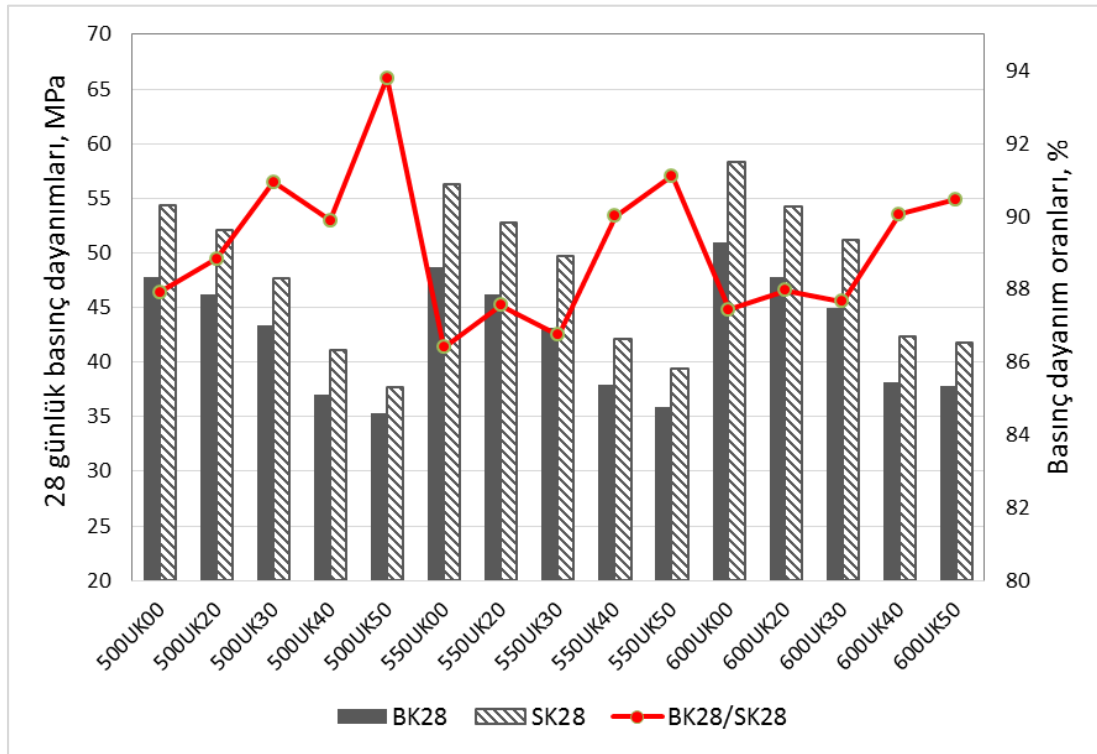
Şekil 5. 1 Günlük Basınç Dayanımlarının 28 Günlük Standart Basınç Dayanımına Oranları (Ratios of 1-Day Compressive Strength to 28-Day Standard Compressive Strength)

3.3. Buhar Kürünün 28 Günlük Basınç Dayanımları Üzerindeki Etkisi (The Effect of Steam Curing on 28-Day Compressive Strengths)

Şekil 6'da buhar kürlü ve standart kürlü numunelerin 28 günlük basınç dayanımları ve basınç dayanım oranları görülmektedir. Standart kür uygulanan kontrol betonlarının 28 günlük basınç dayanımları 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlar için sırasıyla 54.4 MPa, 56.3 MPa ve 58.3 MPa değerlerine ulaşırken, uçucu kül ikamesinin artması dayanımların azalmasına yol açmış, %50 uçucu kül ikameli betonlarda sırasıyla 37.7 MPa, 39.4 MPa ve 41.8 MPa değerine inmiştir. Taşdemir, betondaki en zayıf halka olan çimento-agrega arayüzey bölgesinin iyileşmesi için mineral katkıların inceliğinin çok önemli olduğunu belirterek uçucu külün boyutunun yeterince ince olmadığını vurgulayarak hem puzolanik aktivitesinin hem de dolgu etkisinin yeterince iyi olmaması nedeniyle basınç dayanımında azalmaya yol açtığını belirtmiştir (Taşdemir, 2003). Buhar kürü uygulanan betonlarda, kontrol betonlarının 28 günlük basınç dayanımları 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlar için sırasıyla 47.8 MPa, 48.7 MPa ve 51.0 MPa değerlerine ulaşırken %50 uçucu kül ikame edilen betonlarda basınç dayanımları aynı

sıra ile 35.4 MPa, 35.9 MPa ve 37.8 MPa değerine düşmüştür. Her üç dozaj için de buhar kürü uygulanan betonların 28 günlük basınç dayanımlarında standart kür görenlere kıyasla azalma olmuştur. Öztekin, ısı işlem uygulamasının ileri yaş basınç dayanımında oluşturduğu bu azalmanın nedenini, yüksek sıcaklıkta hidrasyon sonucu kristalleşme oranının artması ve kristal boyutlarının büyümesiyle kristaller arasındaki köprülerin azalması, daha heterojen ve boşluklu bir yapı oluşması ve ileri yaşlardaki hidrasyon derecesinin 20 °C'ye oranla daha düşük olması şeklinde açıklamıştır (Öztekin, 1983).

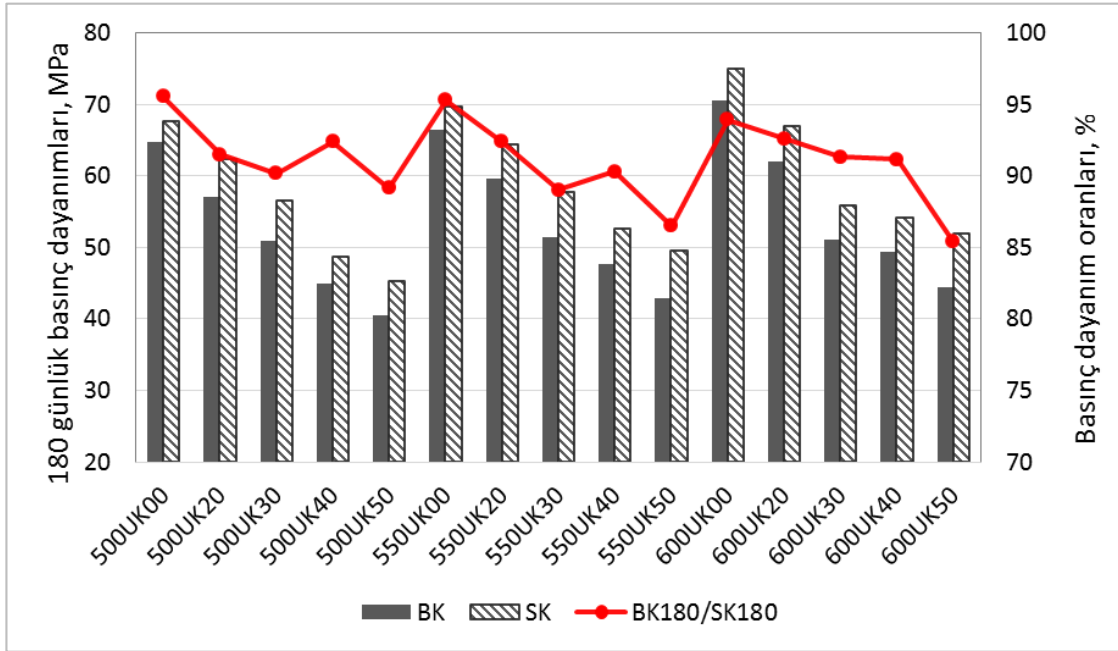
Şekil 6'da aynı zamanda buhar kürlü ve standart kürlü numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının birbirine oranı görülmektedir. Her üç dozajda da uçucu kül ikame oranı arttıkça basınç dayanım oranları da artmıştır. Bu oranlar uçucu kül kullanılmayan kontrol betonlarında 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ için sırasıyla %88, %86 ve %87 olmuştur. %50 uçucu kül ikameli betonlarda ise oranlar aynı sırayla %94, %91 ve %90 olmuştur. Yani uçucu kül ikame oranının artması 28 günde buhar kürlü betonların dayanım kaybının daha az olmasına yol açmıştır. Shi ve arkadaşları, mineral katkıların ısı hasarının etkisini azalttığını, bu nedenle buharla kürlenmiş betonun uzun vadeli performansı için faydalı olabileceğini söylemiştir (Shi vd., 2020). Uçucu küllü harçların yüksek sıcaklıkta kürlenmesinin uzun vadeli basınç dayanımı üzerindeki faydalı etkisi, çoğu kimyasal reaksiyon gibi puzolanik reaksiyonun da sıcaklıktan önemli ölçüde etkilenmesi gerçeğiyle açıklanabilir (Fraay vd, 1989). Fraay ve arkadaşları, sıcaklığın çimentonun hidrasyon reaksiyonlarını hızlandırarak sistemdeki OH⁻ iyon konsantrasyonunu arttırdığını, gözenek çözeltisinin pH seviyesinin 13.2'nin üzerine çıkmasının uçucu kül partiküllerinin daha iyi çözünmesine neden olduğu söyleyerek uçucu külün hidrasyonunun kür sıcaklığının yükselmesiyle nasıl hızlandığını açıklamışlardır. Berry ve Malhotra ise, puzolanik reaksiyonun ısı ile bir kez başlatıldığında, sıcaklık düşürülse bile devam edeceğini ve uçucu kül parçacıklarının yüzeyi bir kez çözüldüğünde, hidrasyonun çok daha kolay olduğunu söylemişlerdir (Berry ve Malhotra, 1980).



Şekil 6. 28 Günlük Basınç Dayanımları ve Basınç Dayanım Oranları (28-Day Compressive Strengths And Strength Ratios)

3.4. Buhar Kürünün 180 Günlük Basınç Dayanımları Üzerindeki Etkisi (The Effect of Steam Curing on 180-Day Compressive Strengths)

Şekil 7'de buhar kürlü ve standart kürlü numunelerin 180 günlük basınç dayanımları görülmektedir. Standart kür uygulanan kontrol betonlarda 180 günlük basınç dayanımları 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlarda sırasıyla 67.8 MPa, 69.8 MPa ve 75.0 MPa değerlerine ulaşmış, uçucu külün %50 ikame edildiği betonların dayanımları sırasıyla 45.4 MPa, 49.7 MPa ve 52.0 MPa değerlerine düşmüştür. Buhar kürlü betonlarda ise kontrol betonları sırasıyla 64.8 MPa, 69.8 MPa ve 70.5 MPa dayanım değerleri verirken uçucu külün %50 ikame edildiği betonların dayanımları 40.4 MPa, 43.0 MPa ve 44.4 MPa değerlerine düşmüştür.



Şekil 7. 180 Günlük Basınç Dayanımları ve Basınç Dayanım Oranları (180-Day Compressive Strengths And Strength ratios)

Şekil 7'de aynı zamanda basınç dayanım oranları verilmiştir. 180 günlük buhar kürlü ve standart kürlü basınç dayanım oranları kontrol betonlarında 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlarda sırasıyla %95.6, %95.3 ve %93.4 olmuştur. Bu oranlar 28 günlük dayanım oranları ile kıyaslanırsa buhar kürenün olumsuz etkisinin 180 günde azaldığı görülmektedir. Diğer yandan, uçucu kül ikameli betonlarda her üç dozajda da ikame oranı arttıkça dayanım oranları azalma eğilimindedir. Basınç dayanım oranları %50 ikame oranı için 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlarda sırasıyla %89.2, %86.5 ve %85.4 olmuştur. Yazıcı ve arkadaşları da yaptıkları çalışmada %50 uçucu kül içeren buhar kürlü beton 90 günde 40 MPa dayanım verirken standart kür uygulanan betonun 60 MPa olduğunu belirtmiş, buhar küre uygulamasının, yüksek hacimli uçucu kül betonunun ileri yaştaki basınç dayanımını standart kür kadar iyileştirmedeğini söylemişlerdir (Yazıcı vd., 2005).

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada buhar kürenün farklı dozajlarda uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların kısa ve uzun süreli basınç dayanımı üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla çimento ağırlığının %0, %20, %30, %40 ve %50' si oranında uçucu kül ikame edilen 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ dozajlı kendiliğinden yerleşen betonların buhar küre sonrası 1 gün, 28 gün ve 180 günlük basınç dayanımları standart kür gören betonlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Uçucun kül ikame oranı arttıkça her üç dozajda da standart ve buhar kürlü betonların basınç dayanımları her yaşta azalmıştır.
2. Buhar küre standart kürelemeyle kıyasla 1 günde tüm numunelerin basınç dayanımını iyileştirmiştir. %50 uçucu kül ikameli olanlar dışında buhar küre uygulanan tüm KYB'lerin 1 günlük basınç dayanımı prekast elemanların kalıp sökümü için uygun dayanım olarak kabul edilen 20 MPa'nın üzerinde olmuştur.
3. Buhar kürenün standart kürele kıyaslandığında 1 günde sağladığı dayanım artışı uçucu kül ikame oranı arttıkça atarak %48-%93 arasında gözlemlenmiştir.
4. Her üç dozajda da buhar kürlü KYB'lerin 1 günlük basınç dayanımlarının 28 günlük standart basınç dayanımına oranları birbirine yaklaşık düzeyde olmuştur. Bu oran uçucu kül kullanılmayan betonlarda %65, %50 uçucu kül ikameli betonlarda ortalama %44 olarak belirlenmiştir.
5. Uçucu kül ikame oranı arttıkça buhar kürlü KYB'lerin 28 günlük basınç dayanımının standart basınç dayanımına oranı artmıştır. Yani uçucu kül ikamesinin artması buhar kürenün 28 günde oluşturduğu dayanım kaybını azaltmıştır. Dayanım kayıpları %13 ile %6 arasında değişmiştir.
6. Her üç dozajda da uçucu kül ikame oranı arttıkça 180 günlük buhar kürlü ve su kürlü dayanımların birbirine oranı azalmıştır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Ardahanlı, M , Oltulu, M , Alameri, I . (2021). Uçucu Küllü Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri Üzerine Ön Isıtmanın Etkisi . Black Sea Journal of Engineering and Science, 4(3), 81-88.
- Berry, E. E., and Malhotra, V. M. (1980). Fly ash for use in concrete-a critical review. *ACI Journal, Proceedings*, 77(2), 59-73.
- Bingöl, A.F. and Tohumcu, İ. (2013). Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume. *Materials & Design*, 51, 12-18.
- Bosiljkov, V.B., Duh, D. and Zarnic, R. (2010). Time evolution of properties of SCC mixtures produced using crushed limestone aggregate and high content of limestone filler, design, production and placement of self-consolidating concrete. *Rilem Bookseries*, 1, 317-27.
- Calvo, J.L.G., Alonzo, M.C., Luco, L.F. and Velasco, M.R. (2016). Durability performance of sustainable self compacting concretes in precast products due to heat curing. *Construction and Building Materials*, 111, 379-385.
- Cengiz, S. , Kamanlı, M. & Ünal, A. (2020). Investigation of flexural behavior of reinforced concrete beams produced with self compacting and normal concrete . *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* , 8 (2) , 429-438 .
- Derabla, R. and Benmalek, M.L. (2014). Characterization of heat-treated self-compacting concrete containing mineral admixtures at early age and in the long term. *Construction and Building Materials*, 66, 787-794.
- Efnarc. (2002). *Specification and Guidelines for Self Compacting Concrete*, Association House, 99 West Street, Farnham, Surrey GU9 7EN, UK, ISBN 0953973344, 32 p.
- Felekoglu B. (2007). Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). *Resour Conserv Recycl*, 51, 770-91.
- Fraay, A.L.A., Bijen, J.M. and Haan, Y.M. (1989). The reaction of fly ash in concrete a critical examination. *Cement and Concrete Research*, 19(2), 235-246.
- Higginson, E. C. (1961). Effect of Steam Curing on the Important Properties of Concrete. *JACI*, Vol. 58, No. 3, 1961, pp. 281- 298.
- Hwang, S.D., Khatib, R., Lee, H.K. and Khayat, K. (2012). Optimization of steam-curing regime for high-strength, self-consolidating concrete for precast, prestressed concrete applications. *PCI J*, 57, 48-61.
- Liu, B., Xie, Y. and Li, J. (2005). Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 994-998.
- Maltas, Y. and Marchand, J. (1997). Influence of curing temperature on cement hydration and mechanical strength development of fly ash mortars, *Cement and Concrete Research*, 27(7), 1009-1020.
- Öztekın, E., (1983). Beton sertleşmesinin hızlandırılmasında kullanılan ısı işlemler- eğilme dayanımına etkileri, Karadeniz Üniversitesi, Trabzon.
- Ramezaniapour, A.A., Khazali, M.H. and Vosoughi, P. (2013). Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC: A case study in precast concrete, *Construction and Building Materials*, 49, 807-813.
- Ramezaniapour, A.M., Esmaili, Kh, Ghahari, S.A. and Ramezaniapour, A.A. (2014). Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.*, (73), 187-194 (2014).
- Reinhardt, H.W. and Stegmaier, M. (2006). Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of self-compacting concrete (SCC), *Cement and Concrete Research*, 36(5), 879-885,
- Richardson, I.G. (2004). Tobermorite/jennite and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of C-S-H: applicability to hardened pastes of tricalcium silicate, b-dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnace slag, metakaolin, or silica fume. *Cem Concr Res*, 34(9), 1733-77.
- Shi, J., Liu, B., Wu, X., Qin, J., Jiang, J. And He, Z. (2020). Evolution of mechanical properties and permeability of concrete during steam curing process. *Journal of Building Engineering*, 32, 101796.
- Taşdemir, C. (2003). Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete. *Cem Concr Res*, 33(10), 1637-1642.
- Tuyan, M . (2019). Atık Tuğla Tozunun Mineral Katkı Olarak Kullanımının Kendiliğinden Yerleşen Betonun Taze Hal, Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkisi . Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi , 23 (2) , 540-548.
- Türkel, S. and Alabaş, V. (2005). The effect of excessive steam curing on portland composite cement concrete, *Cem Concr Res* , 35(2), 405 - 411.
- Uysal, M. and Mansur, S. (2011). Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *Constr Build Mater*, 25, 4112-20.
- Uysal, M. and Yılmaz, K. (2011). Effect of mineral admixtures on properties of selfcompacting concrete. *Cement Concr Comp*, 33, 771-6.
- Vejmelkova, E., Keppert, M., Grzeszczyk, S., Bartłomiej, S. and Cerny, R. (2011) Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag. *Constr Build Mater*, 25, 1325-31.
- Yazıcı, H., Aydın, S., Yiğite, r H. and Baradan, B. (2005). Effect of steam curing on class C high-volume fly ash concrete mixtures. *Cem Concr Res* , 35(6), 1122-1127.
- Yazıcı, Ş., Arel, H.Ş., (2016). The influence of steam curing on early-age compressive strength of pozzolanic mortars. *Arab J Sci Eng*, 41, 1413-1420.
- Zhimin, H., Junzhe, L. and Kangwu, Z. (2012). Influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of steam-cured concrete. *Energy Procedia*, 16, Part B, 836-841.



A NOVEL BI-OBJECTIVE MODEL FOR A MULTI-PERIOD MULTI-PRODUCT CLOSED-LOOP SUPPLY CHAIN

Nadi Serhan AYDIN*

Department of Industrial Engineering, Istinye University, Istanbul, Turkey

Keywords

Closed-Loop Supply Chain, Multi-Objective Model, Mixed-Integer Model, Goal Attainment Method, Sensitivity Analysis.

Abstract

Closed-loop supply chain (CLSC) is a kind of supply chain which contains forward and backward flows of commodities within a logistics network. In the decision-making process of CLSC, locational, inventory control and transportation issues are addressed to deal with strategic, tactical and operational decisions. This paper utilizes a novel bi-objective mixed-integer linear programming (MILP) model to formulate a multi-period multi-product CLSC design problem considering aggregate cost minimization and service level maximization at the same time. To tackle the bi-objectiveness of the model, goal attainment method (GAM) is applied which is then executed by Gurobi Python API to test the applicability of the suggested model for three different scales (small, medium and large). It is demonstrated that the proposed methodology can find the optimal solutions for different problems in a maximum of 500 seconds. Finally, a set of sensitivity analyses is carried out on the main parameters in order to test the behaviors of the objective functions and suggest managerial insights as well as decision aids. The results reveal that the model is highly dependent on the demand parameter, that is, an increase in demand is closely related to an increase in the aggregate cost and a simultaneous downward trend in the service level.

ÇOK PERİYOTLU ÇOK ÜRÜNLÜ KAPALI DÖNGÜ TEDARİK ZİNCİRİ İÇİN YENİ BİR ÇİFT-AMAÇLI MODEL

Anahtar Kelimeler

Kapalı-Döngü Tedarik Ağı, Çok Amaçlı Model, Karmaşık-Tamsayılı Model, Hedefe Ulaşma Yöntemi, Duyarlılık Analizi.

Öz

Kapalı döngü tedarik zinciri (KDTZ), bir lojistik ağ içinde ürünlerin ileri ve geri akışlarını içeren bir tür tedarik zinciridir. KDTZ'nin karar verme sürecinde, stratejik, taktik ve operasyonel kararlarla başa çıkmak için lokasyon, envanter kontrolü ve taşıma konuları ele alınmaktadır. Bu araştırma, aynı anda hem toplam maliyet minimizasyonu hem de hizmet seviyesi maksimizasyonu dikkate alınarak çok periyotlu ve çok ürünlü bir CLSC tasarım problemini formüle etmek için yeni bir çift-amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama (KTDP) modelini kullanmaktadır. Modelin iki yönlülüğünü sağlamak adına hedefe ulaşma yöntemi (GAM) kullanılmış ve daha sonra Gurobi Python API kullanılarak önerilen modelin üç farklı ölçekteki (küçük, orta ve büyük) problemler üzerinde uygulanabilirliği test edilmiştir. Önerilen metodolojinin farklı problemler için en uygun çözümleri maksimum 500 saniyede bulabildiği gösterilmiştir. Son olarak, amaç fonksiyonlarının davranışlarını değerlendirmek ve yönetsel öngörüler ve karar destek çıkarımları sağlamak için anahtar parametreler üzerinde bir dizi duyarlılık analizi yapılmaktadır. sonuçlar modelin talep parametresine yüksek oranda bağlı olduğunu göstermektedir. Öyle ki, talepteki bir artış toplam talepteki artışla ve aynı anda servis seviyesinde görülen aşağı yönlü trendle yakında ilişkilidir.

* ilgili yazar / Corresponding author: serhan.aydin@istinye.edu.tr, +90-0850-283-6000

Alıntı / Cite

Aydın, N.S., (2022). A Novel Bi-Objective Model For A Multi-Period Multi-Product Closed-Loop Supply Chain, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 10(1), 38-49.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

N. S. Aydın, 0000-0002-1453-0016

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 23.09.2021

Revizyon Tarihi / Revision Date 22.10.2021

Kabul Tarihi / Accepted Date 11.02.2022

Yayın Tarihi / Published Date 23.03.2022

1. Introduction

Supply chain is a value creating network and supply chain network design is one of the key components that determine the competitive advantage of a business. Closed-loop supply chains (CLSCs) gained significant importance in recent years due to their honoring of the sustainable development requirements through recycling and the remanufacturing of used products, which is also known as 'reverse logistics'. The idea behind reverse logistics is to reclaim used products, either under warranty or at the end of use/lease period so as to make sure that they are properly disposed, reused, recycled or remanufactured. A thorough discussion on reverse logistics can be recognized in Dekker et al. (2013).

A CLSC refers to a supply chain network where all forward and reverse logistics operations are merged to take place in a single loop to ensure economic circularity as well as environmental and social sustainability in industrial operations. As such CLSC differs from a traditional supply chain with not just its particular focus on long-term profitability and growth, but also its effort to avoid a rapid deprivation of natural resources. Environmental and social sustainability aspect is integrated through a business model which aims to contribute to low-carbon and socially responsible development process (Kumar and Kumar, 2013). The interest in CLSC is on the rise as the benefits arising from shifting to the latter can largely outweigh the costs incurred due to the transformation process. Businesses in general and manufacturers in particular can strengthen their financial positions by reselling refurbished products or substituting recycled products for their conventional raw materials. The aim here is to capture additional value by integrating all supply chain activities – most notably turning users into suppliers.

In this context, the present study is proposing a bi-objective MILP model coupled with a multi-period, multi-product CLSC structure with a view to minimizing the aggregate cost while, at the same time, maximizing the service level. Afterwards, a number of sensitivity analyses are presented to provide decision-makers at organizations with a proper insight into optimal CLSC design policy and help them determine the optimal level of resources to be rendered throughout the CLSC network.

There are various studies in the literature that deal with different aspects of CLSC, such as design, optimization, performance metrics, and pricing. A detailed survey of studies in this domain can be found in Govindan et al. (2015) where authors review 382 articles published between January 2007 and March 2013. Stindt and Sahamie (2014) offer a database of 167 relevant publications on CLSC management in the process industry. The literature on uncertainty factors, methods, and solutions concerning CLSC is more recently presented in Stindt and Sahamie (2014).

Majority of the studies reviewed are found to deal with the design, optimization or configuration of CLSCs taking a multi-objective approach. Besides, Devika et al. (2014), Zhen et al. (2019) and Fathollahi-Fard et al. (2020) put more emphasis on 'sustainable' design of the CLSC.

Mixed-integer linear programming (MILP) models are the most famous methodologies among researchers dealing with the optimization of CLSCs. Pishvaei et al. (2011), a comparison of deterministic MILP model vs. robust MILP model based on various test problems is presented. Kannan et al. (2010), authors use a heuristics-based genetic algorithm (GA) for solving a multi-echelon multi-product multi-period MILP model. Amin and Zhang (2013) employ weighted sum and ϵ -constraint methods to boil their multi-objective model down into a single-objective one and use stochastic programming. In another study, Amin and Zhang (2012) introduce a fuzzy multi-objective MILP model that aims to maximize profit and weights of suppliers, while minimizing the defect rate. Ruimin et al. (2016) and Hajiaghahi-Keshteli et al. (2019) use multi-objective mixed-integer nonlinear programming (MINLP) models. The first paper employs LP-metric method, whereas the latter metaheuristics and hybridized algorithms to solve the proposed models,

respectively. Economical profit/cost, environmental impact, defect rate, social responsibility, carbon emissions are among the most addressed factors that in the objective functions. A non-traditional approach is presented in Ramezani et al. (2014) where financial constraints are integrated into a MILP model which uses an objective function aiming to maximize shareholder's value (measured through change in equity) rather than profit. Paksoy et al. (2011), Olugu and Wang (2012) and Pochampally et al. (2009) rather focus on the performance metrics pertaining to the CLSCs. Kenné et al. (2012) present a numerical algorithm to solve a stochastic dynamic programming model for production planning problem associated with a CLSC. Last but not the least, applications on various industries, such as glass, tires, plastic goods, automotive, electrical and dairy goods, and battery, are presented to showcase the applicability of models (Yildizbasi et al., 2018; Pervin et al., 2019; Goli et al., 2020; Aghighi et al., 2021).

Recently, a robust optimization model is offered by Lotfi et al. (2021) in order to design a CLSC network addressing sustainability, resiliency and conditional value at risk. A heuristic relaxation algorithm is developed by Pazhani et al. (2021) to configure a multi-period multi-product CLSC network. The validation of their proposed model is also evaluated using case studies and hypothetical datasets. Mondal and Roy (2021) examine the effects of COVID-19 pandemic on the sustainable development of CLSC under mixed uncertainty. They also deal with operational decisions through a pick-up-delivery vehicle routing problem.

Based on the above survey, the following items can be listed as the main contributions of the study:

- i. Development of a novel mathematical model for a multi-period multi-product CLSC network,
- ii. Addressing of two important aspects of sustainable development through aggregate cost minimization and service level maximization,
- iii. Application of goal attainment method (GAM) to cope with model bi-objectiveness,
- iv. Presentation of sensitivity analyses to study the impact of the changes in key parameter values.

The structure of the remaining sections is organized as follows: Section 2 describes the problem and proposed mathematical model. GAM is represented in Section 3 as the solution method. The computational results are given in Section 4. Finally, the concluding remarks and outlook are explained in Section 5.

2. Problem Description

In this section, the proposed network as well as the associated mathematical model is presented. In our problem, a CLSC network includes manufacturing plants, distribution centers, customers, collection centers, recovery centers and disposal centers. The first three centers deal with forward logistics and the remaining three centers establish backward logistics. In the first phase and as a strategic decision, the aim is to determine the optimal locations for distribution centers, collection centers, recovery centers and disposal centers given the relationships between them. Then, the tactical decisions in terms of inventory control are made at distribution centers, and in the meantime, operational decisions including transportation planning and determination of product flow between different facilities are put in place.

The two objectives are to minimize the aggregate cost and maximize the service level in order to maximize customer satisfaction. Figure 1 represents the schematic view of the suggested network.

The main assumptions of the model are listed below:

- The proposed network includes 6 different levels of facilities; i.e., manufacturing plants, distribution centers, customers, collection centers, recovery centers and disposal centers,
- Locational decisions are made at distribution centers, collections centers, recovery centers and disposal centers,
- All the required facilities should be located at the beginning of the planning period,
- Capacities of all facilities are limited,
- Parameters are deterministic,
- Multiple products are taken into account,
- There is initial inventory at each distribution center,
- No inventory is held by manufacturing plants,
- Shortage of products is allowed at distribution centers,
- A planning horizon including multiple planning periods is considered,
- Locational, inventory, allocation and transportation decisions are made at the same time.

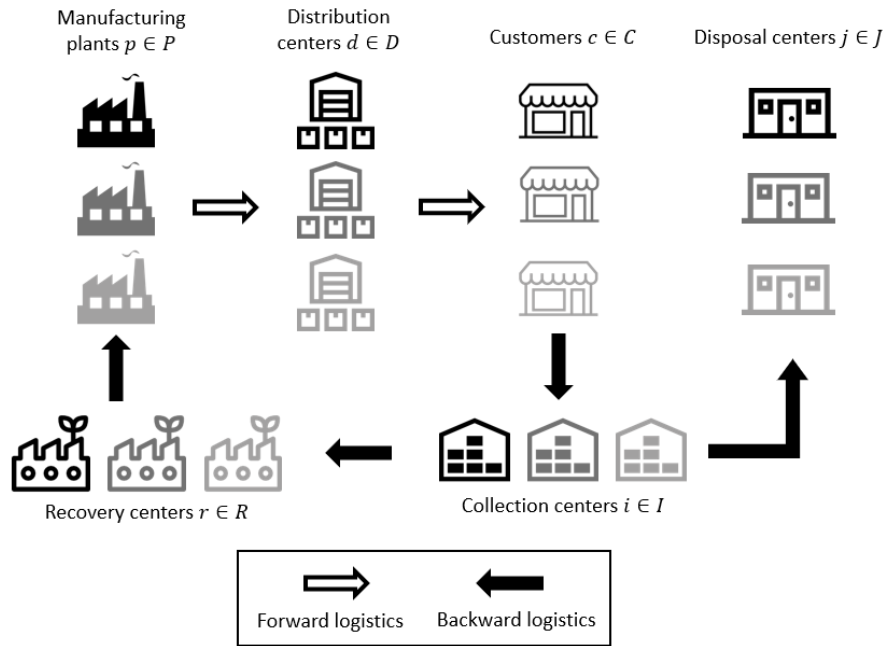


Figure 1. Schematic View of The Proposed CLSC Network of The Problem.

2.1. Mathematical Model

2.1.1. Indices and Sets

- p : Index of manufacturing plants ($p \in P$),
- d : Index of distribution centers ($d \in D$),
- c : Index of customers ($c \in C$),
- i : Index of collection centers ($i \in I$),
- r : Index of recovery centers ($r \in R$),
- j : Index of disposal centers ($j \in J$),
- k : Index of products ($k \in K$),
- t : Index of time periods ($t \in T$).

2.1.2. Parameters

- DM_{ckt} : Demand of customer c for product k in period t ,
- CA_{pk} : Capacity of manufacturing plant p to produce product k in each period,
- CB_{dk} : Capacity of distribution center d to distribute product k in each period,
- CC_{ik} : Capacity of collection center i to collect product k in each period,
- CD_{rk} : Capacity of recovery center r to recover product k in each period,
- CE_{jk} : Capacity of disposal center j to dispose product k in each period,
- TA_{kpd} : Unit shipment cost of product k from manufacturing plant p to distribution center d ,
- TB_{kdc} : Unit shipment cost of product k from distribution center d to customer c ,
- TC_{kci} : Unit shipment cost of product k from customer c to collection center i ,
- TD_{kir} : Unit shipment cost of product k from collection center i to recovery center r ,
- TE_{kij} : Unit shipment cost of product k from collection center i to disposal center j ,
- TF_{krp} : Unit shipment cost of product k from recovery center r to manufacturing plant p ,
- DA_{pd} : Distance between manufacturing plant p and distribution center d ,
- DB_{dc} : Distance between distribution center d and customer c ,
- DC_{ci} : Distance between customer c and collection center i ,
- DD_{ir} : Distance between collection center i and recovery center r ,
- DE_{ij} : Distance between collection center i and disposal center j ,
- DF_{rp} : Distance between recovery center r and manufacturing plant p ,
- α_{kct} : Return rate for product k from customer c in period t ,
- β_{kit} : Return rate for recoverable product k from collection center i to recovery centers in period t ,
- $1 - \beta_{kit}$: Return rate of disposable product k from collection center i to disposal centers in period t ,

FA_{kp} : Unit production cost of product k at manufacturing plant p ,
 FB_{kd} : Unit processing cost of product k at distribution center d ,
 FC_{ki} : Unit processing cost of product k at collection center i ,
 FD_{kr} : Unit processing cost of product k at recovery center r ,
 FE_{kj} : Unit processing cost of product k at disposal center j ,
 LA_d : Fixed establishment cost of distribution center d ,
 LB_i : Fixed establishment cost of collection center i ,
 LC_r : Fixed establishment cost of recovery center r ,
 LD_j : Fixed establishment cost of disposal center r ,
 GI_{kd} : Unit holding cost of product k at distribution center d ,
 GB_{kd} : Unit shortage cost of product k at distribution center d ,
 IO_{kd} : Initial inventory level of product k at distribution center d at the beginning of planning period,
 δ_{pkt} : Demand of manufacturing plant p for recovered product k from recovery centers in period t ,

2.1.3. Variables

X_{kpt} : Amount of product k produced by manufacturing plant p in period t ,
 YA_{kpd} : Amount of product k shipped by manufacturing plant p to distribution center d in period t ,
 YB_{kdc} : Amount of product k shipped by distribution center d to customer c in period t ,
 YC_{kci} : Amount of product k shipped by customer c to collection center i in period t ,
 YD_{kirt} : Amount of product k shipped by collection center i to recovery center r in period t ,
 YE_{kijt} : Amount of product k shipped by collection center i to disposal center j in period t ,
 YF_{krpt} : Amount of product k shipped by recovery center r to manufacturing plant p in period t ,
 ZA_d : A 0-1 variable representing whether distribution center d is established or not,
 ZB_i : A 0-1 variable representing whether collection center i is established or not,
 ZC_r : A 0-1 variable representing whether recovery center r is established or not,
 ZD_j : A 0-1 variable representing whether disposal center j is established or not,
 IV_{kdt} : Amount of inventory level of product k in distribution center d at the beginning of period t ,
 BO_{kdt} : Amount of shortage (back-order) for product k in distribution center d at the beginning of period t .

2.1.4. Objective Functions

Let AC and SL denote aggregate cost and service level, respectively. First objective function given by Eq. (1) defines the aggregate cost minimization including 17 terms. Terms (1)-(4) stand for establishment costs of facilities. Terms (5) and (6) express the inventory holding and shortage costs, respectively. Terms (7)-(12) indicate the transportation costs. Terms (13)-(17) show the processing costs at different facilities.

$$\begin{aligned}
 \min AC = & \sum_{d \in D'} LA_d ZA_d + \sum_{i \in I'} LB_i ZB_i + \sum_{r \in R'} LC_r ZC_r \\
 & + \sum_{j \in J'} LD_j ZD_j + \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} GI_{kd} I_{kdt} + \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} GB_{kd} B_{kdt} \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} TA_{kpd} DA_{pd} YA_{kpd} + \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} TB_{kdc} DB_{dc} YB_{kdc} \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} TC_{kci} DC_{ci} YC_{kci} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} TD_{kir} DD_{ir} YD_{kirt} \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} TE_{kij} DE_{ij} YE_{kijt} + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} TF_{krp} DF_{rp} YF_{krpt} \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} FA_{kp} X_{kpt} + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D} FB_{kd} YA_{kpd} \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} FC_{ki} YC_{kci} + \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} FD_{kr} YD_{kirt} \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} FE_{kj} YE_{kijt}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Our second objective function given by Eq. (2) below deals with service level maximization, whereas service level is defined as the proportion of demand that is fulfilled after considering any shortages (or, backorders) in distribution centers.

$$\max SL = \frac{\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} DM_{ckt} - \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} BO_{kdt}}{\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} DM_{ckt}} \quad (2)$$

2.1.5. Constraints

We can now define our model constraints. Namely, constraint (3) represents the capacity limitation of manufacturing plants to produce various products in each period.

$$X_{kpt} \leq CA_{pk} \quad \forall p \in P, k \in K, t \in T. \quad (3)$$

Constraints (4)-(7) stand for the capacity limitation as well as locational decisions at distribution facilities, collection facilities, recovery facilities and disposal facilities, respectively.

$$\sum_{p \in P} YA_{kpkt} \leq CB_{dk} ZA_d \quad \forall k \in K, t \in T, d \in D, \quad (4)$$

$$\sum_{c \in C} YC_{kcit} \leq CC_{ik} ZB_i \quad \forall k \in K, t \in T, i \in I, \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} YD_{kirt} \leq CD_{rk} ZC_r \quad \forall r \in R, k \in K, t \in T, \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} YE_{kijt} \leq CE_{jk} ZD_j \quad \forall k \in K, j \in J, t \in T, \quad (7)$$

Constraints (8)-(10) show the flows of backward logistics at collection facilities, recovery facilities and disposal facilities, respectively.

$$\sum_{i \in I} YC_{kcit} = \alpha_{kct} \sum_{d \in D'} YB_{kdct} \quad \forall c \in C, k \in K, t \in T, \quad (8)$$

$$\sum_{r \in R} YD_{kirt} = \beta_{kit} \sum_{c \in C'} YC_{kcit} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T, \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} YE_{kijt} = (1 - \beta_{kit}) \sum_{c \in C'} YC_{kcit} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T, \quad (10)$$

Constraint (11) ensures that the amount of products sent by manufacturing facilities to distribution centers do not surpass the produced amount of products at a given period.

$$\sum_{d \in D} YA_{kpkt} \leq X_{kpt} \quad \forall p \in P, k \in K, t \in T, \quad (11)$$

Constraint (12) represents the product flows at distribution centers in which the output flow is restricted to the input flow in a given period.

$$\sum_{c \in C} YB_{kdct} \leq \sum_{p \in P} YA_{kpkt} \quad \forall d \in D, k \in K, t \in T, \quad (12)$$

Constraint (13) expresses the balance between input and output flow at collection centers.

$$\sum_{c \in C} YC_{kcit} = \sum_{r \in R} YD_{kirt} + \sum_{j \in J} YE_{kijt} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T, \quad (13)$$

Constraint (14) expresses the balance between input and output flow at recovery centers.

$$\sum_{p \in P} YF_{krpt} = \sum_{i \in I} YD_{kirt} \quad \forall r \in R, k \in K, t \in T, \quad (14)$$

Constraint (15) guarantees that the products shipped from recovery centers to manufacturing plants do not exceed their demands from recovered products.

$$\sum_{r \in R} YF_{krpt} \leq \delta_{pkt} \quad \forall p \in P, k \in K, t \in T, \quad (15)$$

Constraint (16) ensures that the amount of products transported from distribution facilities to each customer do not exceed its demand considering the shortages.

$$\sum_{d \in D} (YB_{kdct} + BO_{kdt}) = DM_{ckt} \quad \forall c \in C, k \in K, t \in T, \quad (16)$$

Constraints (17) and (18) indicate the inventory balance at the first period and the remaining periods, respectively.

$$IO_{kd} + \sum_{p \in P} YA_{kpkt} - \sum_{c \in C} YB_{kdct} = IV_{kdt} \quad \forall k \in K, d \in D, t \in \{1\}, \quad (17)$$

$$IV_{kdt-1} + \sum_{p \in P} YA_{kpkt} - \sum_{c \in C} YB_{kdct} = IV_{kdt} \quad \forall k \in K, d \in D, t \in \{2, 3, \dots, T\}, \quad (18)$$

Finally, constraints (19) and (20) define variable domains.

$$ZA_d, ZB_i, ZC_r, ZD_j \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, d \in D, j \in J, r \in R, \quad (19)$$

$$X_{kpt}, YA_{kpkt}, YB_{kdct}, YC_{kcit}, YD_{kirt}, YE_{kijt}, YF_{krpt}, IV_{kdt}, BO_{kdt} \in \mathbb{R}^+ \quad (20)$$

$$\forall i \in I, d \in D, j \in J, r \in R, p \in P, \forall k \in K, c \in C, t \in T.$$

3. The solution method: GAM

GAM is one of the well-known approaches to deal with multi-objectivenss which was first introduced by Gembicki and Haimes (1975). It includes a set of supreme goals, $U^* = \{u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*\}$, that correspond to a set of objective functions, $F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\}$. The supreme value of each objective function is achieved by individually optimizing the single-objective model corresponding to that objective function. Furthermore, importance weights $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ are assigned to each objective function, such that $\sum_{j=1}^n w_j = 1$. Eventually, the single-objective model that results from GAM can be represented as follows:a

$$\min Z_{GAM} = \varphi \quad (21)$$

$$f_j(x) - w_j \varphi \leq u_j^* \quad (j = 1), \quad (22)$$

$$f_j(x) + w_j \varphi \geq u_j^* \quad (j = 2), \quad (23)$$

where φ is a free scalar variable, subject to constraints (3)-(20). Here, $f_1(x) = \text{AggregateCost}$ and $f_2(x) = \text{ServiceLevel}$. Moreover, we take into account $(w_1, w_2) = (0.6, 0.4)$, and u_1^* and u_2^* are found by optimizing the primal single-objective model with the first and second objective function, respectively.

4. Experimental results

This section summarizes the computational results obtained for our proposed methodology using three problem instances that are randomly generated. For this purpose, Gurobi Python API is utilized to implement the model. Tables 1 and 2 illustrate the input information related to the problem scale and parameters, respectively. Here, $U(a, b)$ refers to continuous uniform distribution. Figure 2 illustrates the significant impact of the problem scale on computational complexity and runtimes. The model results for the three sample problems are represented in Table 3 in terms of the objective function values and runtimes.

Table 1. Information About Different Problem Scales

Problem	<i>P</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>I</i>	<i>R</i>	<i>J</i>	<i>K</i>	<i>T</i>
#1	2	2	10	2	2	2	2	2
#2	4	4	20	4	4	4	4	4
#3	8	8	40	8	8	8	8	8

Table 2. Input Parameters of The Mathematical Model

Parameter	Value	Parameter	Value
DM_{ckt}	U(20,40)	DA_{pd}	U(10,50)
CA_{pk}	U(1000,2000)	DB_{dc}	
CB_{dk}	U(200,500)	DC_{ci}	
CC_{ik}	U(300,800)	DD_{ir}	
CD_{rk}		DE_{ij}	
CE_{jk}		DF_{rp}	
TA_{kpd}	U(2,12)	α_{kct}	U(0.1,0.2)
TB_{kdc}		β_{kit}	U(0.2,0.4)
TC_{kci}		FA_{kp}	U(10, 20)
TD_{kir}		FB_{kd}	U(2, 5)
TE_{kij}		FC_{ki}	
TF_{krp}		FD_{kr}	
LA_d		FE_{kj}	
LB_i	U(100000,200000)	IO_{kd}	U(100, 500)
LC_r		δ_{pkt}	U(200, 400)
LD_j		GB_{kd}	U(20, 30)
GI_{kd}	U(1, 2)		

Table 3. Computational Results Obtained For The Proposed Methodology

Problem	Z_{GAM}	u_1^*	u_2^*	AggregateCost	ServiceLevel	Runtime (s)
#1	0.194	676022.518	1	676022.634	0.923	1.06
#2	0.089	1476802.274	1	1476802.327	0.964	2.19
#3	272131.165	6442388.235	0.988	6605666.934	0.983	457.64

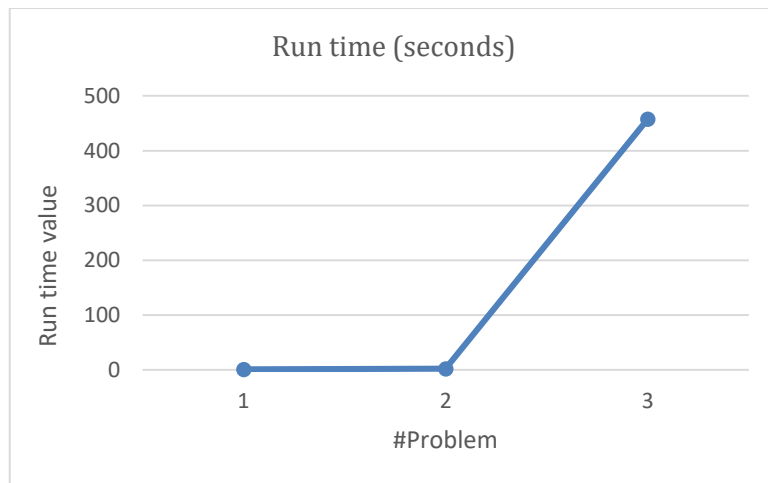


Figure 2. Run Time Comparison of Different Problems

Furthermore, in order to evaluate the reactions of the objective functions to the changes in key parameter values (i.e., demand and return rates), a set of sensitivity analyses is conducted. The results of these analyses are presented in Table 4 and Figures 3-5.

Table 4. Results of the sensitivity analyses

DM_{ckt}	-20%	-10%	0%	+10%	+20%
AC	676022.624	676022.630	676022.634	684512.182	693001.847
SL	0.929	0.925	0.923	0.923	0.923
α_{kct}	-20%	-10%	0%	+10%	+20%
AC	676022.632	676022.633	676022.634	678039.408	680056.299
SL	0.924	0.923	0.923	0.923	0.923
β_{kit}	-20%	-10%	0%	+10%	+20%
AC	676022.634	676022.634	676022.634	676210.134	676397.750
SL	0.923	0.923	0.923	0.923	0.923

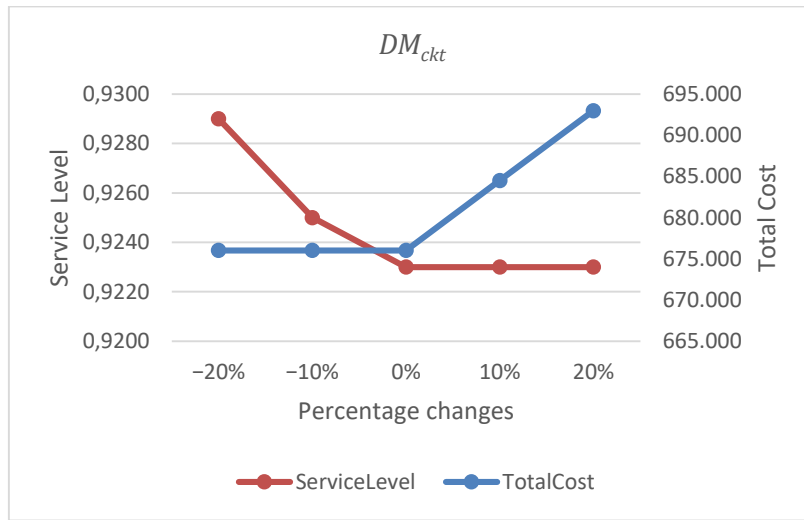


Figure 3. Sensitivity analysis for DM_{ckt}

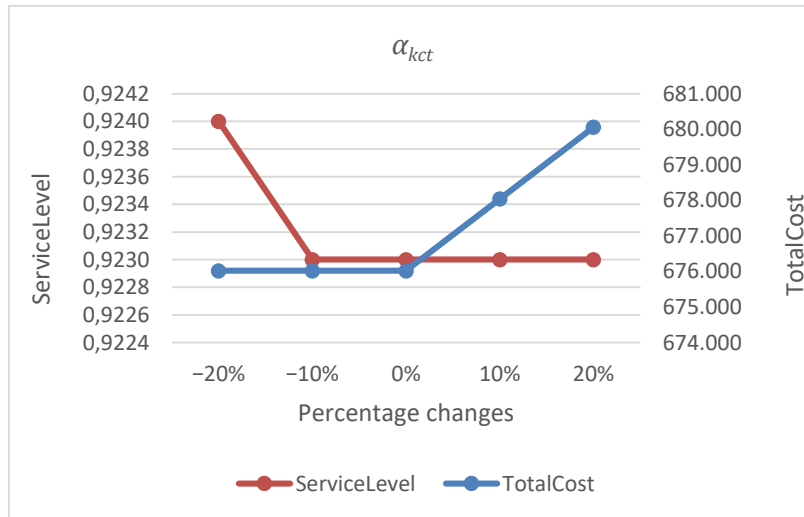


Figure 4. Sensitivity analysis for α_{kct}

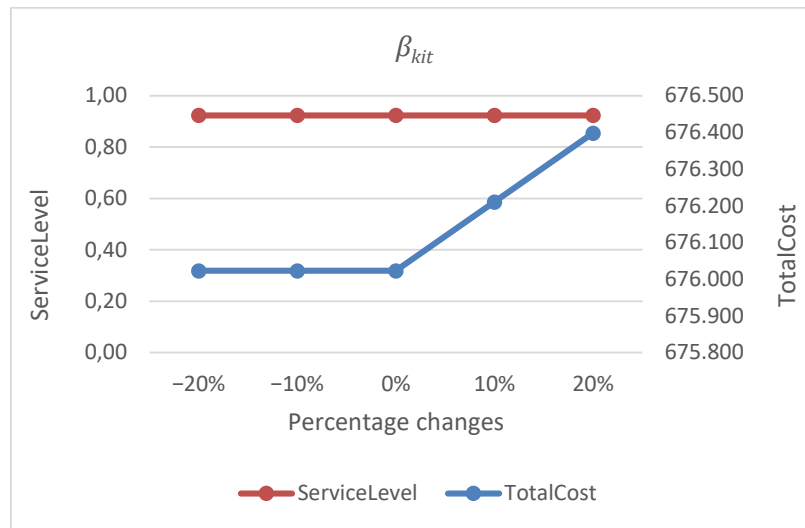


Figure 5. Sensitivity analysis for β_{kit}

We can observe from Table 4 and Figures 3-5 that change in key parameter values can significantly affect the solution values and, thereby, optimal policy. Demand turns out to be the most important parameter when compared to the return rates as the objective function values show a higher sensitivity to the fluctuations in demand. By increasing the demand parameter, we see that the aggregate cost also increases while service level follows a downward trend. A similar behaviour is also observed for the product return rates α_{kct} . Yet, for different change intervals considered for the recoverable product return rates β_{kit} (from collection to recovery facilities), service level remains fixed and shows almost no change. On the other hand, it is positively correlated to the aggregate cost.

With the help of these implications, managers and decision makers can decide on the optimal policy for the timing and amount resources to be utilized throughout the CLSC network.

5. Conclusion and Outlook

In this study, a multi-period multi-product CLSC network design that simultaneously minimizes the aggregate cost and maximize the service level is proposed. Six different network elements, namely, manufacturing plants, distribution centers, customers, collection facilities, recovery facilities and disposal facilities, were taken into account to make strategic, tactical and operational decisions. A novel bi-objective MILP model was then formulated to represent the problem. Moreover, GAM was employed to tackle the bi-objectiveness of the model. To test the efficiency of the model, three problems in different scales were analyzed using the Gurobi Python API. Finally, a set of sensitivity analyses were conducted to evaluate the responses of objective function values to the changes in demand as well as two return rate parameters. It was demonstrated that the objective value is most sensitive to the demand parameter and, therefore, the latter should be paid utmost attention by managers during the decision-making process.

The following outlook is presented for future research:

- i. Objectives such as total pollution minimization and total job opportunity maximization can be incorporated into the problem with a view to addressing more issues from sustainable development domain,
- ii. Assumptions can be relaxed to make the model more realistic by handling parameter uncertainty and using approaches such as fuzzy programming, robust optimization and stochastic optimal control,
- iii. Application of heuristic and meta-heuristic algorithms can be considered to tackle the model complexity at larger scales,
- iv. Different transportation modes and routing decisions can be accommodated in the model to make the latter closer to the real-world.

Acknowledgement

This research was conducted as part of “2535 TÜBİTAK-MSRT Joint Call for Proposals 2020” with Project ID: 119N668.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

References

- Aghighi, A., Goli, A., Malmir, B., & Tirkolaee, E. B. (2021). The stochastic location-routing-inventory problem of perishable products with renegeing and balking. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1-20.
- Amin, S. H., & Zhang, G. (2012). An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach. *Expert Systems with Applications*, 39(8), 6782-6791.
- Amin, S. H., & Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4165-4176.
- Amin, S. H., & Zhang, G. (2013). A three-stage model for closed-loop supply chain configuration under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 51(5), 1405-1425.
- Chuang, C. H., Wang, C. X., & Zhao, Y. (2014). Closed-loop supply chain models for a high-tech product under alternative reverse channel and collection cost structures. *International Journal of Production Economics*, 156, 108-123.
- Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, K., & van Wassenhove, L. N. (Eds.). (2013). *Reverse logistics: quantitative models for closed-loop supply chains*.
- Devika, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 594-615.
- Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghahi-Keshteli, M. (2018). A stochastic multi-objective model for a closed-loop supply chain with environmental considerations. *Applied Soft Computing*, 69, 232-249.
- Fathollahi-Fard, A. M., Ahmadi, A., & Al-e-Hashem, S. M. (2020). Sustainable closed-loop supply chain network for an integrated water supply and wastewater collection system under uncertainty. *Journal of Environmental Management*, 275, 111277.
- Garg, K., Kannan, D., Diabat, A., & Jha, P. C. (2015). A multi-criteria optimization approach to manage environmental issues in closed loop supply chain network design. *Journal of Cleaner Production*, 100, 297-314.
- Gaur, J., Amini, M., & Rao, A. K. (2017). Closed-loop supply chain configuration for new and reconditioned products: An integrated optimization model. *Omega*, 66, 212-223.
- Gembicki, F., & Haimes, Y. (1975). Approach to performance and sensitivity multiobjective optimization: The goal attainment method. *IEEE Transactions on Automatic control*, 20(6), 769-771.
- Giri, B. C., & Sharma, S. (2015). Optimizing a closed-loop supply chain with manufacturing defects and quality dependent return rate. *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 92-111.
- Goli, A., Tirkolaee, E. B., & Weber, G. W. (2020). A perishable product sustainable supply chain network design problem with lead time and customer satisfaction using a hybrid whale-genetic algorithm. In *Logistics operations and management for recycling and reuse* (pp. 99-124). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Golroudbary, S. R., & Zahraee, S. M. (2015). System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 53, 88-102.
- Govindan, K., Jha, P. C., & Garg, K. (2016). Product recovery optimization in closed-loop supply chain to improve sustainability in manufacturing. *International Journal of Production Research*, 54(5), 1463-1486.
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European journal of operational research*, 240(3), 603-626.
- Hajiaghahi-Keshteli, M., & Fard, A. M. F. (2019). Sustainable closed-loop supply chain network design with discount supposition. *Neural computing and applications*, 31(9), 5343-5377.
- Kannan, G., Noorul Haq, A., & Devika, M. (2009). Analysis of closed loop supply chain using genetic algorithm and particle swarm optimisation. *International Journal of Production Research*, 47(5), 1175-1200.
- Kannan, G., Sasikumar, P., & Devika, K. (2010). A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling. *Applied mathematical modelling*, 34(3), 655-670.
- Kenné, J. P., Dejax, P., & Gharbi, A. (2012). Production planning of a hybrid manufacturing–remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 81-93.
- Kumar, N.R. and Kumar R.M.S. (2013). *Closed Loop Supply Chain Management and Reverse Logistics – A Literature Review*, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 6(4), pp. 455-468.
- Lotfi, R., Mehrjerdi, Y. Z., Pishvaei, M. S., Sadeghieh, A., & Weber, G. W. (2021). A robust optimization model for sustainable and resilient closed-loop supply chain network design considering conditional value at risk. *Numerical Algebra, Control & Optimization*, 11(2), 221.
- Mohammed, F., Selim, S. Z., Hassan, A., & Syed, M. N. (2017). Multi-period planning of closed-loop supply chain with carbon policies under uncertainty. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51, 146-172.
- Mondal, A., & Roy, S. K. (2021). Multi-objective sustainable opened-and closed-loop supply chain under mixed uncertainty during COVID-19 pandemic situation. *Computers & Industrial Engineering*, 159, 107453.
- Olugu, E. U., & Wong, K. Y. (2012). An expert fuzzy rule-based system for closed-loop supply chain performance assessment in the automotive industry. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 375-384.
- Özceylan, E., & Paksoy, T. (2013). A mixed integer programming model for a closed-loop supply-chain network. *International Journal of Production Research*, 51(3), 718-734.
- Paksoy, T., Bektaş, T., & Özceylan, E. (2011). Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(4), 532-546.
- Panda, S., Modak, N. M., & Cárdenas-Barrón, L. E. (2017). Coordinating a socially responsible closed-loop supply chain with product recycling. *International Journal of Production Economics*, 188, 11-21.

- Pazhani, S., Mendoza, A., Nambirajan, R., Narendran, T. T., Ganesh, K., & Olivares-Benitez, E. (2021). Multi-period multi-product closed loop supply chain network design: A relaxation approach. *Computers & Industrial Engineering*, 155, 107191.
- Peng, H., Shen, N., Liao, H., Xue, H., & Wang, Q. (2020). Uncertainty factors, methods, and solutions of closed-loop supply chain—A review for current situation and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120032.
- Pervin, M., Roy, S. K., & Weber, G. W. (2019). Multi-item deteriorating two-echelon inventory model with price-and stock-dependent demand: A trade-credit policy. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 15(3), 1345.
- Pishvaei, M. S., & Torabi, S. A. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 161(20), 2668-2683.
- Pishvaei, M. S., Rabbani, M., & Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied mathematical modelling*, 35(2), 637-649.
- Pochampally, K. K., Gupta, S. M., & Govindan, K. (2009). Metrics for performance measurement of a reverse/closed-loop supply chain. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, 1(1), 8-32.
- Ramezani, M., Kimiagari, A. M., & Karimi, B. (2014). Closed-loop supply chain network design: A financial approach. *Applied Mathematical Modelling*, 38(15-16), 4099-4119.
- Ruimin, M. A., Lifei, Y. A. O., Maozhu, J. I. N., Peiyu, R. E. N., & Zhihan, L. V. (2016). Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty. *Chaos, Solitons & Fractals*, 89, 195-202.
- Soleimani, H., & Kannan, G. (2015). A hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for closed-loop supply chain network design in large-scale networks. *Applied Mathematical Modelling*, 39(14), 3990-4012.
- Soleimani, H., Govindan, K., Saghafi, H., & Jafari, H. (2017). Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design. *Computers & industrial engineering*, 109, 191-203.
- Stindt, D., & Sahamie, R. (2014). Review of research on closed loop supply chain management in the process industry. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 26(1), 268-293.
- Yang, G. F., Wang, Z. P., & Li, X. Q. (2009). The optimization of the closed-loop supply chain network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 16-28.
- Yildizbaşı, A., Çalik, A., Paksoy, T., Farahani, R. Z., & Weber, G. W. (2018). Multi-level optimization of an automotive closed-loop supply chain network with interactive fuzzy programming approaches. *Technological and Economic Development of Economy*, 24(3), 1004-1028.
- Zhen, L., Huang, L., & Wang, W. (2019). Green and sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1195-1209.



BİR DOLGU BARAJIN REZERVUARINDAKİ SUYUN ANİ ÇEKİLMESİ SIRASINDAKİ STABİLİTE ANALİZİ

Emre TOPÇU^{1*}, Baki BAĞRIAÇIK², Ahmet ERDAĞ³

¹ Kafkas Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kars, Türkiye

² Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

³ Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Şev, Dolgu Baraj, Ani Su Çekilmesi, Stabilite.</i>	Bu çalışma, geçirimsiz yatak üzerinde kil çekirdekli kurgusal dolgu barajının stabilite analizine ve SLIDE V.6.0 ve PLAXIS yazılımları kullanılarak sonuçların hesaplanmasına odaklanmaktadır. Dolgu şevlerinin stabilitesi beş farklı analiz yöntemi ile kontrol edilmiştir: sırasıyla Fellenuis, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price ve Spencer yöntemleri. Suyun ani çekilme hızının 3m/gün olduğu ve rezervuar su seviyesinin 8 günde 3 m'ye düştüğü varsayılmaktadır. Gözlem sonuçlarına göre barajın memba eğiminin stabilitesi önemli ölçüde azalmıştır, ancak suyun çekilmesi durumunda hala stabildir. Rezervuar su seviyesinin tüm durumları için güvenlik faktörü 1.3'ten büyüktür. Rezervuarda ani su çekilmesinin başlamasından sonra kısa sürede baraj yamaçlarının kaymasına karşı güvenlik faktörünün bir miktar azaldığı, ardından artmaya başladığı sonucuna varılmıştır. Bu, zemindeki efektif gerilmelerin artmasına ve dolayısıyla kayma mukavemetinin artmasına yol açan aşırı boşluk suyu basıncının zamanla azalmasından kaynaklanmaktadır.

STABILITY ANALYSIS OF AN EMBANKMENT DAM DURING RAPID DRAWDOWN OF WATER IN RESERVOIR

Keywords	Abstract
<i>Slide, Embankment Dam, Rapid Drawdown, Stability.</i>	This paper focuses on stability analysis carried out on fictional embankment dam with clay core on impervious bed and calculating results using SLIDE V.6.0 and PLAXIS softwares. The stability of embankment slopes was checked by five different analysis methods: Fellenuis, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price and Spencer methods respectively. It is assumed that rapid drawdown rate 3m/day and reservoir water level falling down to 3 m within 8 days. The stability of the upstream slope of the dam decreased dramatically but still in stable during drawdown condition. The factor of safety was greater than 1.3 for all reservoir condition. It was concluded that the factor of safety against sliding of the dam slopes decreases slightly within the short period after the start of rapid drawdown of water in the reservoir, then starts to increase. This is caused by dissipation of excess pore water pressure with time which leads to increase the effective stresses in the soil and hence increase its shear strength.

Alıntı / Cite

Topçu, E., Bağrıaçık, B., Erdağ, A., (2022). Bir Dolgu Barajın Rezervuarındaki Suyun Ani Çekilmesi Sırasındaki Stabilite Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 50-60.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
E. Topçu, 0000-0003-0728-7035	Başvuru Tarihi / Submission Date 11.05.2021
B. Bağrıaçık, 0000-0002-1860-2881	Revizyon Tarihi / Revision Date 19.09.2021
A. Erdağ, 0000-0001-9380-9439	Kabul Tarihi / Accepted Date 18.11.2021
	Yayın Tarihi / Published Date 23.03.2022

* İlgili yazar / Corresponding author: emretopcu01@gmail.com, +90-474-225-1279

1. Giriş (Introduction)

Kentleşme ve insan faaliyetlerinin olumsuz etkileri sebebiyle kuraklık artmıştır. Dünya nüfusunun yaklaşık %13'ü şu anda içme suyundan mahrumdur. Su kıtlığı mevcut su talebi doğrultusunda artacaktır. Dolgu barajlar, suyun depolanması için en önemli ve hayati yapılardan biridir ve su kaynakları yönetiminde kullanılırlar (Ramachandra ve Khaled 1999).

Suyun ani geri çekilmesi sırasında stabilite analizi, dolgu barajlarının tasarımında önemli bir husustur. Ani su çekilmesi sırasında, suyun memba yüzü üzerindeki dengeleyici etkisi kaybolur, ancak set içindeki gözenek suyu basınçları yüksek kalabilir. Sonuç olarak, barajın memba yüzünün stabilitesi çok azalabilir. Dolgudaki boşluk suyu basıncının yayılması, büyük ölçüde dolgu malzemelerinin geçirgenliği ve depolama karakteristiğinden etkilenir. Yüksek geçirgenliğe sahip malzemeler ani çekilme sırasında hızla boşalır, ancak geçirgenliği düşük malzemelerin süzülmesi uzun zaman alır. Bu uç durumlar, taşkın sularının ani olarak geri çekilme evresinde ya da uzun süren kuraklığın son dönemlerinde maksimum seviyeye ulaşan tarımsal ve toplumsal su ihtiyacı nedeniyle oluşabilmektedir.

Toprak dolgu barajlarda değişik nedenlerle hazne seviyesinde ani düşüşler meydana gelmektedir. Hazne su seviyesinin ani düşmesi olayına örnek olarak, haznesinde geçici bir süre taşkın suyunu depolayan sel kapanları gösterilebilir (Çalamak vd. 2015).

Yapının stabilitesini korumak için dolgu barajlarda stabilite ve sızıntı analizi çok önemlidir. Dolgu barajlar, yapının ömrü boyunca gelişen her türlü kuvvet/zorlama durumuna karşı stabil olarak inşa edilecek şekilde tasarlanmalıdır. Çoğunlukla yükleme koşulları, ani düşme ve sürekli sızıntı gibi kritiktir ve bu da temel boyunca veya set içinde borulanmaya neden olabilir (Devi ve Anbalagan 2017).

Bu çalışmada, rezervuardaki suyun ani aşağı çekilme koşulunun bir dolgu barajının stabilitesi üzerindeki etkisi, özellikle memba yamacı için incelenmiştir. Ani çekilme hızı 3m/gün olarak seçilmiştir. Depolanan suyun 8 günde, rezervuarın taban kotuna 3 m kalana kadar düştüğü varsayılmıştır. Ani su çekilme sırasında farklı su seviyelerine karşılık gelen 5 farklı limit denge yöntemi için güvenlik değerleri faktörü SLIDE V.6.0 Rocscience (2010) yazılımı ile hesaplanmıştır. Ayrıca, set barajında 8 günlük rezervuar ani çekilme süresi boyunca baraj gövdesi boyunca boşluk suyu basıncı (kPa) değerleri de belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, sonlu elemanlar yöntemini kullanan PLAXIS yazılımı ile memba şev güvenlik katsayıları incelenmiştir. Son olarak sayısal analiz ve sonlu elemanlar yöntemi sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Pek çok dolgu baraj, haznesinin aniden boşalması sebebiyle memba şevi duraylılığını kaybederek çökmüştür ve bu çökmelerden birçoğu baraj hazne seviyesi yaklaşık yarı seviyesine kadar azaldığında meydana gelmiştir (Sherard vd. 1963).

Literatürde yer alan çalışmalarda, hazne seviyesindeki suyun azalma hızı 0.1 m/gün olanlar normal, 0.5 m/gün olanlar önemli, 1.0 m/gün ve daha yüksek düşme hızına sahip olanlar ise olağan dışı düşme hızı olarak belirtilmiştir (Alonso ve Pinyol 2009).

Suyun aşağıya doğru ani çekilmesi, memba yan eğimi için en tehlikeli koşullardan biri olarak bilinir. Karşı yöndeki memba su basıncı ortadan kalktığında, memba eğimi için tehlike oluşturur. Memba kabuğu, suyun ani düşüşü nedeniyle hidrodinamik basınç altında stabil kalmaz. Baraj gövdesi içindeki zeminler doymuş durumda kalır ve buradan memba eğimine doğru sızıntı başlar. Sızıntı ve hidrodinamik basınçlar, memba eğimine etki eden aşağı doğru kuvvetler oluşturur. Bunlar stabiliteye terstir ve memba eğimi için kritik bir koşul oluşturur. Ani Düşüş Koşulu, suyu tutmak için kullanılan bir şevin, su seviyesinde ani bir düşüş yaşandığında ve şevdeki iç gözenek basınçları yeterince hızlı düşemediğinde ortaya çıkar (Khassaf vd. 2013).

Şevler, eğimli ve desteksiz kütlelerdir. Doğa tarafından oluşturulabileceği gibi insan yapımı da olabilirler. Bunları dolgu ve kırıklar olarak gözlemleyebiliriz. Şev stabilitesi çalışmalarında, herhangi bir şevdeki istikrarsızlık günümüzde zorlu bir iştir. Kararsızlık birçok faktörle ortaya çıkabilir. Doğal eğimler bile, geometri değişikliği, dışarıdan kuvvetlerin etki etmesi, kesme kuvvetinin azalması gibi nedenlerle stabiliteyi kaybederler. Bunun nedeni, zemindeki kayma gerilmelerinin, zeminin karşılık gelen kesme dayanımından daha büyük olmasıdır. (Laxminarayana ve Naresh 2017).

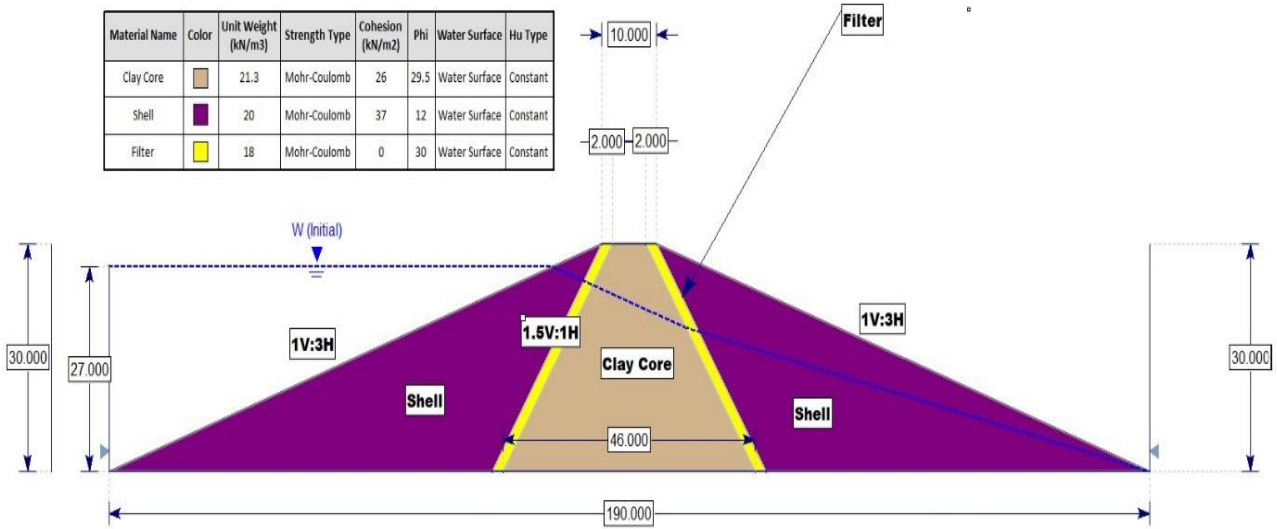
Toprak barajların duraylılığının bozulması; yapısal istikrarsızlık, aşırı hidrolik eğimler, baraj gövdesi veya baraj temelinden sızıntı, ani düşme ve sismik uyarımlar gibi etkenlerle meydana gelir. Şev analizi için Fellenius (1936)

tarafından önerilen ilk sınır denge yöntemi, dairesel kayma yüzeyi için potansiyel kayma kütlelerini ayrı dikey dilimlere bölme fikrine dayanmaktadır. Bishop (1955) ile Bishop ve Morgenstern (1960) yeni bir dilim arası normal kuvvet ekleyerek dilim yöntemini yeniden formüle etti ve güvenlik faktörünü (Factor of Safety) büyük bir hassasiyetle hesapladı. Aynı zamanda Janbu (1954) dairesel olmayan göçme yüzeyleri için basitleştirilmiş bir yöntem geliştirdi. Daha sonra, Morgenstern ve Price (1965), Spencer (1967), moment ve kuvvet dengesini tamamlayan hem dilimler arası normal kuvvetleri hem de dilimler arası kesme kuvvetlerini içeren, dairesel olmayan kırılma ve dairesel göçme yüzeyi için dilim yöntemini yeniden yapılandırmışlardır (Himanshu ve Burman 2017).

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Material (Material)

Geçirimsiz tabaka üzerinde hayali bir dolgu barajı olduğu varsayılmıştır. Dolgu barajı USBR (1987) kriterlerine göre tasarlanmıştır. Toplam baraj yüksekliği 30 metredir. Kret genişliği 10 metredir. Memba ve mansap eğimleri 1V(vertical): 3H(horizontal)'dir. Dolgu barajının hem memba hem de mansap eğimi 1.5V: 1H olan bir kil çekirdeği (clay core) vardır. Kil çekirdek, her iki tarafında 2 metre kalınlığında filtrelere sahiptir. Su rezervuarında maksimum su seviyesi 27 metredir. Şekil 1'de dolgu baraj kesiti görülmektedir.



Şekil 1. Dolgu barajının kesiti (Cross section of embankment dam)

Toprak barajın hayali olmasına rağmen, kil çekirdek, kabuk (shell) ve filtrenin tüm parametreleri literatürdeki gerçek vaka çalışmalarından elde edilmiştir. Kil çekirdek, kabuk ve filtre parametreleri sırasıyla Khattab (2010), Laxminarayana ve Naresh (2017) ve Fattah vd. (2017) çalışmalarından alınmıştır. Analizde kullanılan malzemeler Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. Kil çekirdek, filtre ve kabuğun malzeme özellikleri (Material properties of clay core, filter and shell)

	Kil Çekirdek	Filtre	Kabuk
Kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)	17.88	18	18.82
İçsel sürtünme açısı (°)	29.5	30	-
Kohezyon (kN/m ²)	26	0	37
Permeabilite (m/sec)	$3.5 \cdot 10^{-11}$	0.07	-
Poisson oranı	0.35	-	0.3

3.2. Method (Method)

Şevlerin stabilitesini değerlendirmek için limit denge tekniklerine dayanan farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu denklemler arasında temel olarak dilim içi kuvvetler ve eğim yüzeyinin şeklinin yanı sıra dilim içi kesme ile normal kuvvetler arasındaki varsayılan ilişki arasındaki farklar dikkate alınır (Erdağ 2020).

Baraj gövdesi boyunca boşluk suyu basıncı SLIDE V.6.0 yazılımında B-bar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Güvenlik faktörünü belirlemeye yönelik stabilite analizi, 5 farklı limit denge yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bunlar Fellenius, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price ve Spencer yöntemleridir. Bu yöntemlerin kısa açıklamaları aşağıda listelenmiştir.

3.2.1 The B-bar Yöntemi (The B-Bar Method)

B-bar yöntemini kullanan aşırı boşluk basıncı kavramı, boşaltma senaryolarına uygulanabilir. Düşük geçirgenliğe sahip bir malzemeden bir yük hızlı bir şekilde kaldırılırsa, "negatif aşırı boşluk suyu basıncı" indüklenebilir. Boşluk suyu basıncındaki değişiklik Denklem 1'de verilmektedir:

$$\Delta u = \bar{B} \Delta \sigma_v \quad (1)$$

B (B-bar) bir malzeme için toplam boşluk basınç katsayısı olduğunda, σ_v dikey toplam gerilmelerdir. SLIDE V.6.0'da, bu, toprak barajlarındaki gölet suyunun hızlı çekilmesi nedeniyle boşluk suyu basıncı değişikliklerini simüle etmek için kullanılabilir (Rocscience 2018).

3.2.2 Fellenius Yöntemi (Fellenius Method)

Ordinary yöntemi, dairesel bir kayma yüzeyi için moment dengesini karşılar, ancak hem dilimler arası normal hem de kesme kuvvetlerini ihmal eder. Bu yöntemin avantajı, denklemin bir yineleme işlemi gerektirmemesinden kaynaklanan (F)'yi çözmedeki basitliğidir. F 'nin elde edilmesi Denklem 2'de gösterilmektedir.

$$F = \frac{\sum(c'l + N'tan\phi')}{\sum W sin\alpha} \quad (2)$$

$$N' = (W cos\alpha - ul) \quad (3)$$

Burada c ve ϕ , sırasıyla efektif gerilme terimleri olarak kohezyon ve içsel sürtünme açılarıdır.

l = dilim tabanının uzunluğu(m).

W =her bir dilimin ağırlığı (kN).

u = boşluk suyu basıncı (kN/m²)

α = dilimin ortasındaki kayma yüzeyinin eğimi

3.2.3 Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi (Simplified Bishop Method)

Bishop yöntemi, dairesel kayma yüzeyi için uygulamada çok yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem dilimler arası normal kuvvetleri dikkate alır. Ancak dilimler arası kesme kuvvetlerini ihmal eder. Bu yöntem (F) için moment dengesini sağlar ve Denklem 4'deki gibi elde edilir.

$$N' = \frac{1}{m_\alpha} \sum \left(W - \frac{c'l sin\alpha}{F} - ul cos\alpha \right) \quad (4)$$

Deneme değeri olan m_α , güvenlik faktörü ve miktar için varsayılır ve Denklem 5 yardımıyla hesaplanır

$$m_\alpha = cos\alpha \left(1 + tan\alpha \frac{tan\phi}{F} \right) \quad (5)$$

3.2.4 Basitleştirilmiş Janbu Yöntemi (Simplified Janbu Method)

Bu yöntem, bir kompozit kayma yüzeyine (yani dairesel olmayan) dayanır ve (Ff), yatay kuvvet dengesi ile belirlenir. (Bishop Basitleştirilmiş Yöntem) 'de olduğu gibi bu yöntem moment dengesini sağlamaz ve dilimler arası normal kuvvetleri (E) dikkate alır, ancak kesme kuvvetlerini (T) ihmal eder. Ff , Denklem 6 yardımıyla bulunur.

$$F = \frac{\sum(c'l + (N - ul)\tan\phi')\sec\alpha}{\sum W\tan\alpha + \sum\Delta E} \quad (6)$$

3.2.5 Morgenstern-Price Yöntemi (Morgenstern-Price Method)

Bu yöntem hem kuvvet hem de moment dengelerini karşılar ve dilim içi kuvvet fonksiyonunu varsayar. Morgenstern-Price yöntemine göre, dilim içi kuvvet eğimi, keyfi bir fonksiyonla ($f(x)$) şu şekilde değişebilir:

$$T = f(x)\lambda E \quad (7)$$

Burada: $f(x)$ = Kayma yüzeyi boyunca sürekli değişen dilim arası kuvvet fonksiyonu.

λ = varsayılan fonksiyonun ölçek faktörü.

E = dilim arası normal kuvvet (kN).

3.2.6 Spencer Yöntemi (Spencer's Method)

Bu yöntem, dilim içi kuvvetler için yapılan varsayım dışında aynı (Morgenstern-Price) yöntemine benzer. Kesitler arası kuvvetler için sabit bir eğim varsayılır ve (F) hem moment hem de kuvvet dengeleri için hesaplanır. Bu yöntemine göre, dilimler arası kesme kuvveti (T) Spencer ile ilgilidir.

$$T = E\tan\phi \quad (8)$$

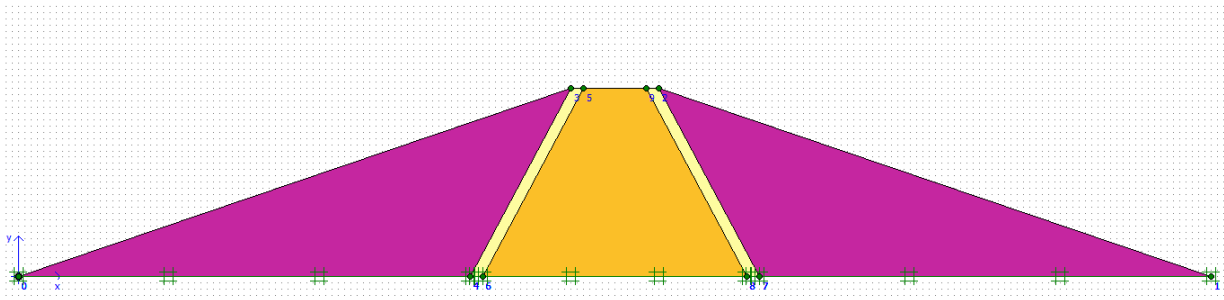
E = dilim arası normal kuvvet (kN).

ϕ = ara dilim sonuç kuvvetinin eğim açısı (Abbas vd. 2017)

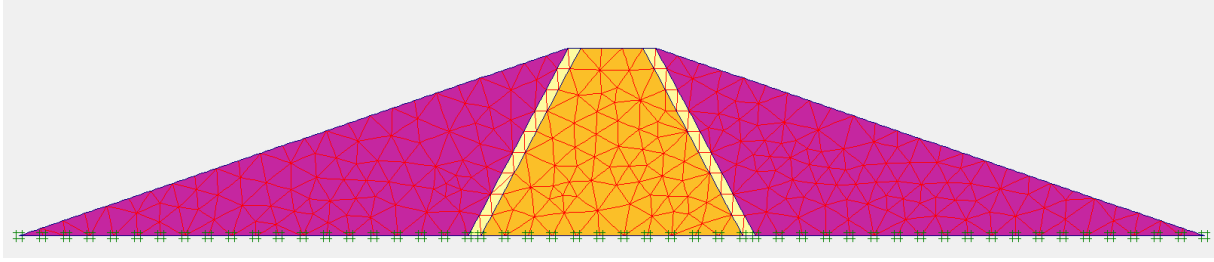
Tasarımcının şev stabilitesi analizlerinde uygun bir güvenlik faktörü sağlaması normaldir. Bu, tasarlanan eğimlerin güvenli olduğundan emin olunması ve zeminde hareket ettirilen gerilmenin kayma direncine eşit veya daha fazla olduğu kritik koşulları önlemek ve yanlış veri analizi, zayıf işçilik, ve denetleme gibi beklenmedik faktörleri engellemek için önemlidir. Güvenlik faktörü 1.0'dan küçükse şev güvensiz, 1.0 ile 1.2 arasında ise şevin güvenliğinden şüphe duyulur, güvensiz, 1.3 ile 1.4 arasında ise dolgular için tatminkar ama baraj için şüpheli, 1.5 ile 1.75 arasında ise baraj için güvenlidir (Khattab 2010).

3.2.7 Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method)

Geçirimsiz tabaka üzerine inşa edilen toprak dolgu barajı sonlu elemanlar yöntemine dayanan PLAXIS paket programı ile analiz edilmiştir. Toprak dolgu barajın yüksekliği 30 m ve kret yüksekliği 10 m olarak modellenmiştir. Toprak dolgu barajın şev kısmı da 1 düşey/3 yatay olacak şekilde modellenmiştir. Su rezervuarındaki su yüksekliği 8 günde 27 metreden 3 metreye düşmüştür. Modellemede de bu durum dikkate alınmıştır. Toprak dolgu baraj, PLAXIS paket programında modellenirken Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılmıştır. Analizlerde zemin, çevre, sınır ve yükleme koşulları toprak dolgu baraj ile aynı seçilmeye çalışılmıştır. Deney kasasının geometrik modeli, iki boyutlu ve aksenal simetrik olarak ve en sık ağ sıklığında oluşturulmuştur. Zemin ortamı 15 düğümlü üçgen elemanlarla modellenmiştir. Modellemede kullanılan zemin parametreleri Tablo 1'de görülmektedir. Modellemede kullanılan toprak dolgu barajın sonlu elemanlar programındaki kesiti Şekil 2'de ve sonlu elemanlar ağ sıklığı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. Sonlu elemanlar programı kesit modeli (Finite elements program section model)

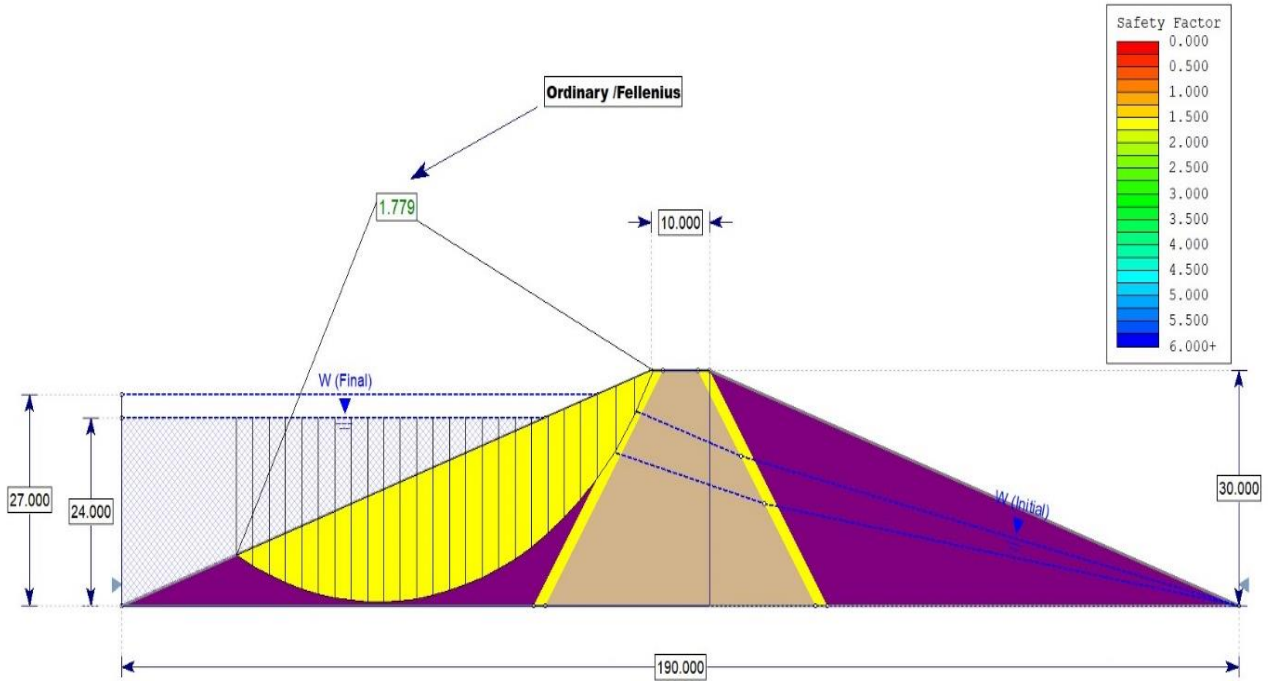


Şekil 3. Sonlu elemanlar programı ağ sıklığı (Finite element program network frequency)

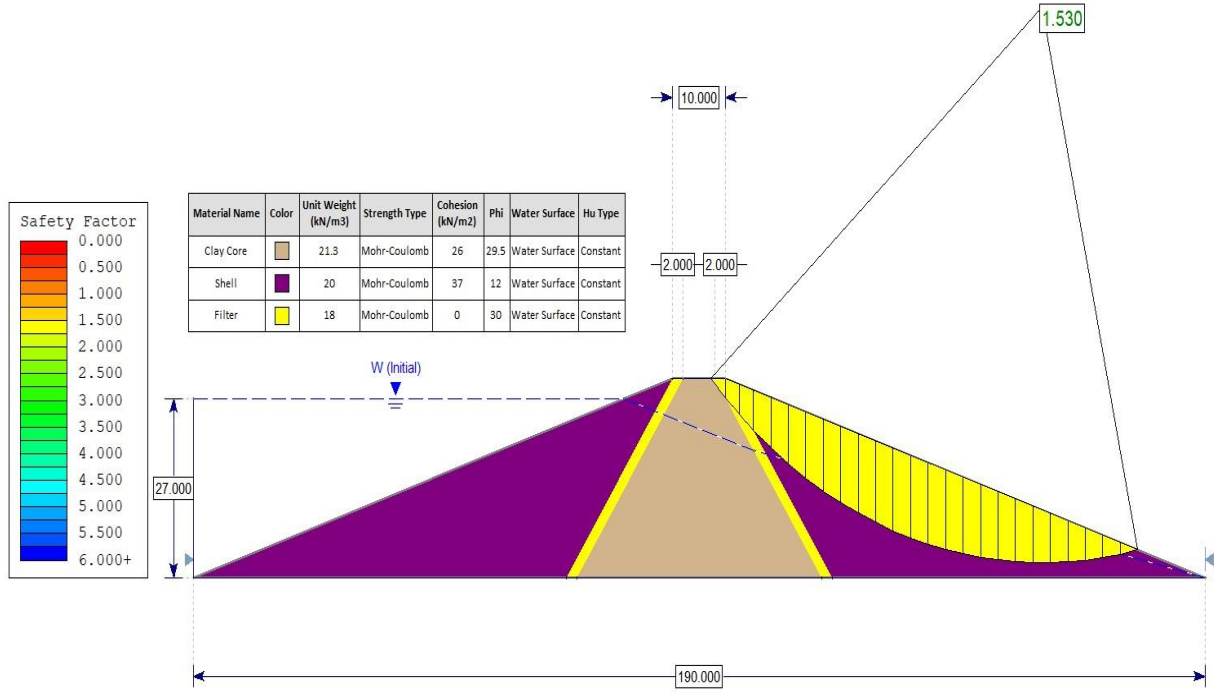
4. Analiz Sonuçları (Analysis Results)

4.1. Rezervuar Suyunun 8 Günde 3 m'ye Düşmesi (Reservoir Water Go Down to 3 m in 8 Days)

Bu bölümde, barajın memba yüzünün ani su çekilmesi sırasında kritik eğim olması nedeniyle stabilitesi incelenmiştir. Bu durumun sonuçları, su seviyesinin maksimum su seviyesinden (27 m'den) 24 m'ye düştüğünde SLIDE V.6.0 yazılımı ile Fellenius dilim yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonrası dolgu barajının bir bölümünü temsil eden Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi maksimum su seviyesinde mansap güvenlik faktörü 1.530'dur.



Şekil 4. 24 m su seviyesinde memba güvenlik faktörü (Upstream safety factor at 24 m water level)



Şekil 5. Mansabın maksimum su seviyesindeki kararlılığı (Stability of downstream at maximum water level)

Bu olgunun (ani düşmenin) tam mekanizması şu şekildedir: Rezervuarın yeterince uzun bir süre boyunca yüksek bir seviyede tutulduğu ve böylece barajın dolgu malzemesinin tamamen doyduğu ve sürekli sızıntı oluşturduğu varsayılmaktadır. Rezervuar bu aşamada aşağı çekilirse, akışın yönü tersine çevrilerek toprak barajının memba eğiminde istikrarsızlığa neden olur. "Anlık" aşağı çekilme varsayımsal bir durumdur ve kayan yüzey boyunca gözenek basınçları, sonlu elemanlar ağıнын farklı noktalarındaki "anlık" gözenek suyu basıncının incelenmesiyle belirlenir.

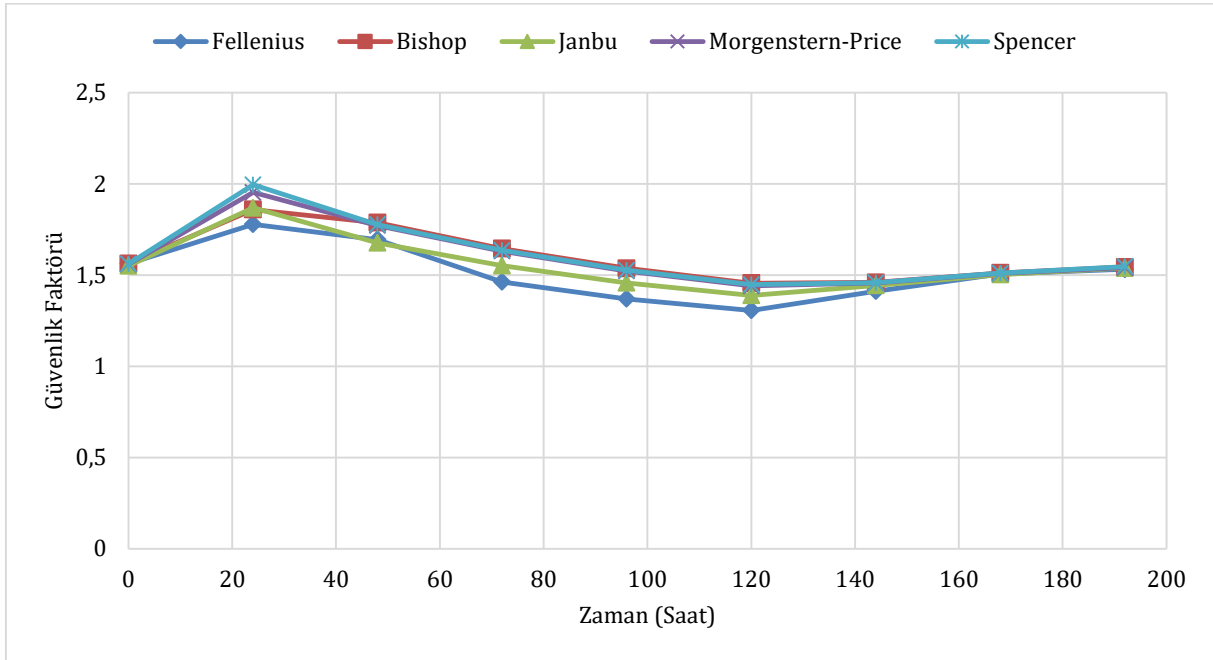
Ani su çekilmesinde en kritik koşul, "dolu rezervuar" durumunda memba eğimine etki eden su basıncı azalırken, baraj içindeki doymuş toprağın su içeriğinde kayda değer bir değişiklik olmaması durumunda meydana gelir (Fattah vd. 2017).

Beş yöntemle farklı zamanlarda tahmin edilen güvenlik faktörünün değerleri Tablo 2'de listelenmiştir. Minimum güvenlik faktörü değerleri koyu punto ile belirtilmiştir. 5 yöntem karşılaştırıldığında Fellenius yöntemiyle membada daha küçük emniyet faktörlerinin hesaplandığı görülmüştür. Bu sebeple Fellenius yönteminin tasarımcıyı daha güvenli tarafta bırakacağı düşünülebilir. Ancak Morgenstern-Price yönteminin dilimler arası kuvvetleri de hesaba kattığı göz önüne alınırsa, bu yöntemin daha hassas emniyet faktörleri verdiği söylenebilir.

Tablo 2. Memba için güvenlik faktörünü hesaplama yöntemleri (Methods for calculating factor of safety for upstream)

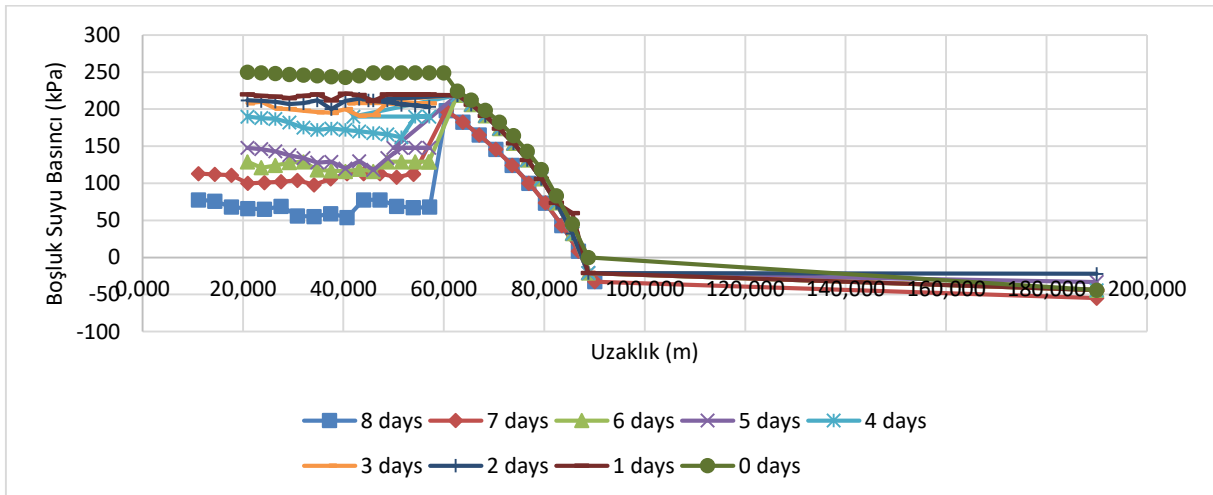
Yükseklik (h) (m)	Zaman (saat)	Fellenius Bishop Janbu Morgenstern-Price Spencer				
		Memba	Memba	Memba	Memba	Memba
27 (max.)	0	1.563	1.564	1.55	1.559	1.561
24	24	1.779	1.859	1.869	1.953	1.995
21	48	1.694	1.787	1.677	1.772	1.777
18	72	1.463	1.645	1.552	1.631	1.636
15	96	1.37	1.537	1.457	1.522	1.527
12	120	1.306	1.456	1.389	1.441	1.448
9	144	1.412	1.46	1.443	1.457	1.458
6	168	1.506	1.512	1.503	1.509	1.511
3 (min.)	192	1.532	1.544	1.539	1.541	1.547

Şekil 6, güvenlik faktörünün zaman içindeki değişimini göstermektedir. Rezervuar boşalmaya başladıktan sonraki ilk (120) saat güvenlik faktörünün biraz azaldığı, ardından hızla artmaya başladığı fark edilebilir. Bu, zemindeki efektif gerilmelerin artmasına ve dolayısıyla kayma mukavemetinin artmasına yol açan aşırı boşluk suyu basıncının zamanla azalmasından kaynaklanır. Memba şevi emniyet faktörünün azalmadan sonraki artışının ilk durumdaki emniyet faktörüne erişecek kadar olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 6. Beş farklı yöntem için güvenlik faktörü değerlerinin değişimi (Change of safety factor values for five different methods)

Şekil 7 ve Tablo 2'deki değerlerden, Fellenius yöntemindeki minimum güvenlik faktörü, 8 gün içerisinde rezervuar boşaltımı sırasında 5. günde elde edilen 1.306'ya eşittir ve bu sonuç, Bishop's yönteminde yer alan minimum güvenlik faktörü ile eşleşmektedir. Bishop's'ta da 5. gündür ve 1.456'ya eşittir. Ancak Janbu, Morgenstern-Price ve Spencer yöntemlerinde minimum değer sırasıyla 1.389, 1.441 ve 1.448'dir. Ani su çekilmesinin etkisini göstermek amacıyla, rezervuardan 8 günlük deşarj süresi için baraj kesiti boyunca boşluk suyu basıncındaki değişikliği hesaplamak için Şekil 1'de gösterilen kesit seçilmiştir. Sonuçlar Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 7. 8 Günlük rezervuarın deşarj süresince baraj gövdesi boyunca gözenek suyu basıncındaki değişim (The change in pore water pressure across the dam body during the 8-day reservoir discharge)

Burada Şekil 7'de, gözenek suyu basınç hattının davranışında önemli bir değişiklik fark edilir, Değişiklik 120. saat zamanında başlar ve bu, son beş eğride (8, 7, 6, 5 ve 4 günlük değişim grafiklerinde) görüldüğü gibi memba yönüne geri gelen suyun hızı üzerindeki çekirdek etkisini temsil eder.

Ani su çekilmesi sırasında, setin üst yüzündeki suyun stabilite edici etkisi kaybolur, ancak set içindeki boşluk suyu basınçları yüksek kalabilir. Sonuç olarak, barajın memba yüzünün stabilitesi çok azalabilir. Dolgudaki boşluk suyu

basıncının yayılması, büyük ölçüde dolgu malzemelerinin geçirgenliği ve depolama karakteristiğinden etkilenir. Yüksek geçirgenliğe sahip malzemeler ani çekilme sırasında hızla boşalır, ancak geçirgenliği düşük malzemelerin süzülmesi uzun zaman alır (GEO-SLOPE International Ltd 2007).

Karşı yöndeki memba boşluk suyu basıncı ortadan kalktığında, memba eğimi için tehlike oluşturur. Baraj gövdesi içindeki zeminler doymuş durumda kalır ve buradan memba şevine doğru sızıntı başlar. Sızıntı ve hidrodinamik basınçlar, memba şevine etki eden aşağı doğru kuvvetler oluşturur. Bunlar stabiliteyi etkiler ve memba şevi için kritik bir koşul oluşturur. Derin oturmuş göçme yüzeylerinin gelişmesi mümkün olsa da, zemin kenar eğimleri üzerindeki etki en yaygın olarak nispeten sığ şev bozulmaları şeklinde görülür, bu da gözetimsiz bırakılırsa tüm barajın kademeli olarak bozulmasına yol açabilir (Reddi 2003).

Rezervuar ani bir şekilde tahliye edildiğinde ve aşağı çekildiğinde, baraj gövdesindeki boşluk suyu basınçları iki şekilde azaltılır: drenaj nedeniyle gözenek suyu basıncında daha yavaş bir dağılım olur ve su yükünün tamamının ve bir kısmının kaybolması nedeniyle anında elastik bir etki oluşur.

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Şev Güvenlik Katsayılarının Belirlenmesi (Determination of Slope Safety Coefficients with Finite Element Method)

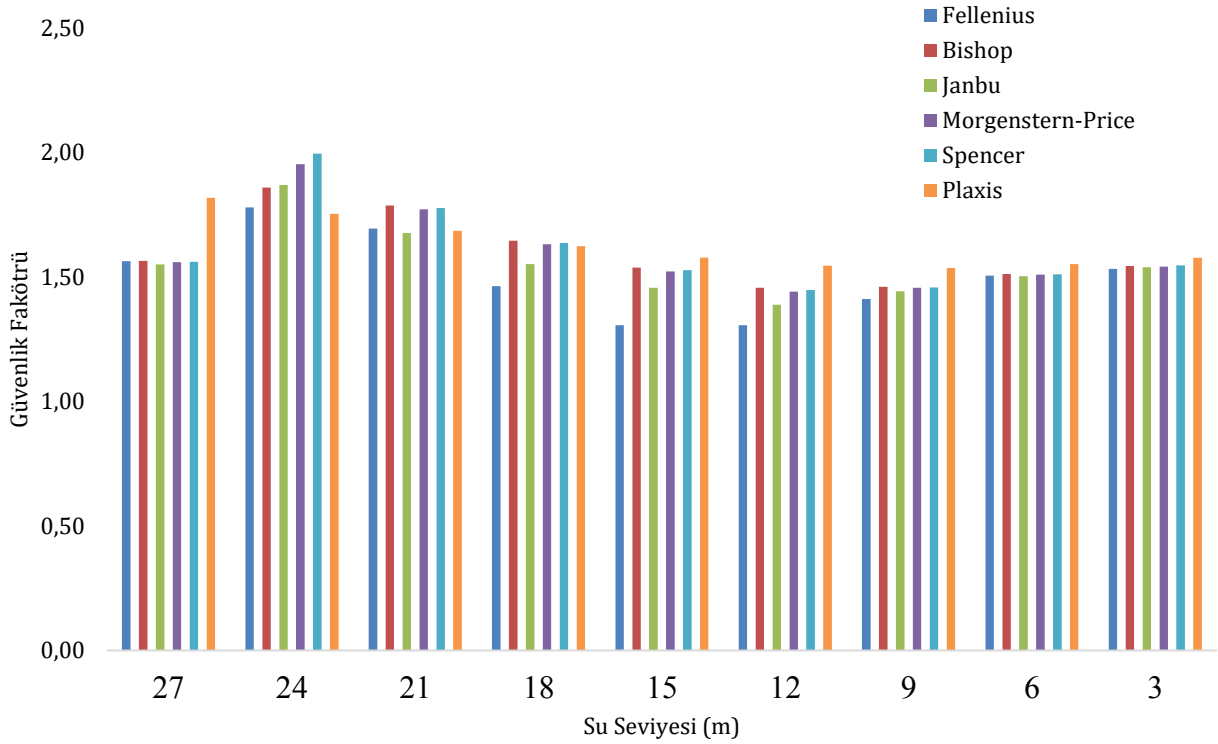
Sonlu elemanlar yöntemine dayanan PLAXIS paket programı ile yapılan analizler sonrasında güvenlik faktörünün değişimi, Tablo 3'te sunulmuştur. Sonuçlara göre tüm su seviyelerinde güvenlik sayılarının 1'in üzerinde ve güvenilir olduğu görülmüştür. Su seviyesi 9 metreye kadar güvenlik sayısının 1.818'den 1.536'ya kadar düştüğü gözlenmiştir. Bu seviyeden sonra ise, güvenlik sayısı tekrar artarak 1.577 seviyelerine kadar yükselmiştir. Rezervuar boşalmaya başladıktan güvenlik faktörünün biraz azalması ve ardından hızla artmaya başlaması, toprak dolgudaki gerilmelerin artmasına ve dolayısıyla kayma mukavemetinin artmasına yol açan aşırı boşluk suyu basıncının zamanla azalmasından kaynaklandığı göstermektedir.

Tablo 3. PLAXIS paket programı ile elde edilen memba yüzeyi güvenlik faktörleri (Upstream surface safety factors obtained with the PLAXIS package program)

Yükseklik (h) (m)	Zaman (saat)	Memba
27	0	
24	24	1.754
21	48	1.685
18	72	1.624
15	96	1.578
12	120	1.545
9	144	1.536
6	168	1.552
3	192	1.577

4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması (Finite Element Method and Comparison of Numerical Analysis Results)

Sayısal analizler sonucu elde edilen güvenlik faktörleri ve sonlu elemanlar analizi ile belirlenen güvenlik faktörleri Şekil 8'de sunulmuştur. Sonuçlara göre, sayısal analizlerle elde edilen güvenlik faktörleri ile sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen güvenlik faktörlerinin uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ancak, bütün su seviyelerinde Sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenen güvenlik faktörlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, sayısal analizlerde su seviyesi 9 metreye kadar güvenlik faktörlerinde azalma sonrasında artış meydana gelirken sonlu elemanlar yönteminde 12 metreye kadar güvenlik faktörlerinde azalma sonrasında artış meydana gelmiştir.



Şekil 8. Sonuçların karşılaştırılması (Comparison of results)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

SLIDE V.6.0 ve PLAXIS yazılımları kullanılarak yapılan bu çalışmada, toprak dolgu barajda stabilite analizleri incelenmiştir. Ani çekilme sırasında, baraj gövdesindeki boşluk suyu basıncı azalır ve bu da kararlı hal akımının gerçekleştiğini gösterir. Barajın mansabındaki bazı noktalar, suyun aşağı çekildiği dönemde negatif boşluk suyu basıncından etkilenebilir, bu da su seviyesinin bu noktaların altına düştüğünü gösterir. Rezervuardaki ani su çekilmesinin başlamasından sonra kısa süre içinde baraj yamaçlarının kaymasına karşı güvenlik faktörü biraz azalır, ardından artmaya başlar. Bunun sebebi aşırı boşluk suyu basıncının azalmasıdır.

Ani düşme koşullarında CU (konsolidasyonlu-drenajsız koşul) ve CD (konsolidasyonlu-drenajlı) deneylerine bağlı kompozit kayma dayanım parametrelerinin kullanılması daha uygun olacaktır. Ani düşmede kullanılan kayma dayanımları CU ve CD deney zarflarının en düşük kombinasyonuna göre seçilir. Bu durum için yapılan analizde, ani düşme esnasında boşluk suyu sönümlenmesinin oluşmayacağı ve su seviyesinin ani olarak düştüğü varsayılır Tosun (2020).

Yapılan çalışmanın, iyiden iyiye kendini hissettiren küresel iklim değişikliğine, kuraklığa, susuzluğa çare olabilecek su depolama barajlarının yapımında, yapısal güvenlik açısından fikir vermesi beklenmektedir. Yapısal güvenliğe önem verilmeden sadece amaç doğrultusunda kullanılması göz önüne alınarak yapılan herhangi bir toprak dolgu baraj hem işlevini yerine getiremeyecektir hem de zaman ve mal kaybına neden olacaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Abbas, M.J., Aljanabi, A.Q., Mutiny AZ, 2017. Slope stability analysis of an earth dam, Diyala Journal of Engineering Sciences, Vol. 10, No. 01, pp. 106-117.
- Alonso, E., Pinyol, N., 2009. Slope stability under rapid drawdown conditions. First Italian Workshop on Landslides, s. 11-27. <http://hdl.handle.net/2117/11200>.
- Bishop, A.W., 1955. The use of slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique 5(1):7-17.
- Bishop, A.W., Morgenstern N, 1960. Stability coefficients for earth slopes. Geotechnique 10(4):164-169.
- Çalamak, M., Selamoğlu, M., Yanmaz, A. M., 2015. Toprak Dolgu Barajlarda Hazne Seviyesindeki Ani Düşmenin Şev Stabilitesine Etkilerinin Değerlendirilmesi, 4. Su Yapıları Sempozyumu, 278-287.

- Devi, L.N.D.D., Anbalagan, R., 2017. Study on Slope Stability of Earthen Dams by using GEOSTUDIO Software, International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology. Volume 3, Issue 6, 408-414.
- Erdağ, A., 2020. Suya Doymun Olmayan Zemin Şevlerinde Yağış Yoğunluğunun Stabiliteye Etkisi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 97 sf., Ankara.
- Fattah, Y.M., Omran, A.H., Hassan, A.M., 2017. Flow and stability of Al-Wand earth dam during rapid drawdown of water in reservoir. Acta Montanistica Slovaca. Vol 22, Number 1, 43-57.
- Fellenius, W., 1936. Calculation of stability of earth dams. In: Proceedings of the second congress of large dams, vol 4, pp 445-463.
- GEO-SLOPE International Ltd, 2007. Calgary, Alberta: Rapid Drawdown with Multi-Stage, Canada, 2007, www.geoslope.com (Erişim Tarihi: 19.12.2020).
- Himanshu, N., Burman, A., 2017. Seepage and Stability Analysis of Durgawati Earthen Dam: A Case Study. Indian Geotech J, 49(1):70-89.
- Janbu, N., 1954. Applications of composite slip surfaces for stability analyses. In: Proceedings of the European conference on the stability of earth slopes, Stockholm, vol 3, pp 39-43.
- Khassaf, I.S., Abdoul-Hameed, R.M., Al-deen, S.N.N., 2013. Slope Stability Analysis under Rapid Drawdown Condition and Siesmic Loads of Earth Dam (Case Study: Mandali Dam), International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 2, Issue 12, 7114-7118.
- Khattab, A.A.S., 2010. Stability Analysis of Mosul Dam Under Saturated and Unsaturated Soil Conditions. Al-Rafidain Engineering, Vol 18, No 1, 13-27.
- Laxminarayana, A., Naresh, M., 2017. Analysis of Embankments with Different Fill Materials using PLAXIS-2D, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 45 Number 6, 280-284.
- Morgenstern, N.R., Price, V.E., 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique 15(1):79-93.
- Plaxis 2002. User Manual, 2D version 8, (Edited by Brinkgrève, R.J.B.), Delft University of Technology Plaxis., The Netherlands.
- Ramachandra, R.A., Khaled H.H., 1999. Flood Frequency Analysis, CRC-Press. (ISBN: 9780849300837).
- Reddi, L.N., 2003. Seepage in Soils Principles and Applications, Hoboken (NJ): John Wiley & Sons.
- Rocscience Inc, 2010. Slide Version 6.0-2-D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis, www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.
- Rocscience, 2018. Tutorial 13 Rapid Drawdown (B-bar method). <https://www.rocscience.com/> (Erişim Tarihi: 19.12.2020).
- Sherard, J.L., Woodward, R.J., Gizienski, S.F., 1963. Earth and Earth Rock Dams: Engineering Problems of Design and Construction. John Wiley and Sons, New York, ABD.
- Spencer, E., 1967. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. Geotechnique 17(1):11-26.
- Tosun, H., 2020. Dolgu Barajların Şev Stabilité Analizi: Temel Yaklaşımlar Ve Parametre Seçimi. Su Kaynakları 5:13-21.
- USBR, 1987. Design of Small Dams. United States Bureau of Reclamation, Washington, ABD.



ASFALT KAPLAMALARDA TABAKA KALINLIĞININ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Erol İSKENDER^{*1}, Alper SEYMEN², Atakan AKSOY³

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye

³ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Asfalt Kaplama,
Arazi Performansı,
Kiriş Örnek,
Kiriş Eğilme Deneyi,
Tekerlek İzi Deneyi.*

Öz

Bu çalışmada, arazi koşullarında gerçek silindir sıkıştırması ile üretilerek yaşlanmış kaplamaların kalınlıklarının deformasyon, çatlama direnci ve su hasarı direnci üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kullanılan örnekler, 40mm ile 90mm arasında değişen kalınlıklarda, yol kaplamasından kesilerek alınmıştır. Hamburg tekerlek izi deneyi, deformasyon kontrollü kiriş eğilme deneyi ve tekrarlı-yük kontrollü kiriş eğilme deneyi kaplama örneklerine yapılmıştır. Kaplama özelliklerinin kalınlık değişiminden önemli oranda etkilendiği görülmüştür. Kaplama kalınlığının artması ile deformasyon miktarı da artmış ancak Hamburg tekerlek izi deneyinden elde edilen deformasyon ve su hasarı direnci ile kaplama kalınlığı arasında yüksek korelasyon oluşmamıştır. Hamburg tekerlek izi deneyinde 70mm'den daha kalın örneklerde soyulma büküm noktaları oluşmuştur. Deformasyon kontrollü ve tekrarlı yük kontrollü kiriş eğilme deneylerinde, kaplama kalınlığının artması ile kırılmaya neden olan yük ve aynı miktarda deformasyonun oluşması için gereken yük te artmıştır. Regresyon analizlerinde, kırılma yükü-kaplama kalınlığı ve deformasyon-kaplama kalınlığı arasındaki ilişimde sırasıyla $R^2=0.9734$ ve $R^2=0.9859$ korelasyon katsayıları oluşmuştur.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COURSE THICKNESS IN ASPHALT PAVEMENT

Keywords

*Asphalt Pavement,
In-situ Performance,
Beam Sample,
Beam Bending Test,
Wheel Tracking Test.*

Abstract

In this study, the effect of asphalt pavement thickness on deformation, cracking and water damage resistances was investigated on aged pavement produced by real roller compaction under field conditions. The samples used were cut from the pavement in thicknesses ranging from 40mm to 90mm. Hamburg wheel tracking test (HWTT), deformation-controlled beam bending test and repeated-load controlled beam bending test were performed on pavement samples. It has been observed that the pavement properties are significantly affected by the thickness change. With the increasing thickness of the pavement, the amount of deformation also increased, but there was no high correlation between the deformation and water damage resistance obtained from the HWTT and the pavement thickness. In the HWTT, stripping behaviors were observed in samples thicker than 70mm. In deformation-controlled and repeated load-controlled beam bending tests, the load causing the fracture and the load required for the formation of the same amount of deformation increased with the increase of the pavement thickness. $R^2=0.9734$ and $R^2=0.9859$ correlation coefficients, respectively, were formed in the correlation between fracture load-pavement thickness and deformation-pavement thickness.

Alıntı / Cite

İskender, E., Seymen, A., Aksoy, A., (2022). Asfalt Kaplamalarda Tabaka Kalınlığının Etkisinin Araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 61-73.

* İlgili yazar / Corresponding author: eiskender@ktu.edu.tr

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
E. İskender, 0000-0001-7934-839X	Başvuru Tarihi / Submission Date	30.04.2021
A. Seymen, 0000-0003-2242-603X	Revizyon Tarihi / Revision Date	20.08.2021
A. Aksoy, 0000-0001-5232-6465	Kabul Tarihi / Accepted Date	22.11.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Nüfusun, araç sayısının ve hareketliliğin artması, üretim - tüketimin ve teknolojinin artmasıyla araç dingil yüklerinin yükselmesi, kent merkezlerinde yapılaşmanın ve yoğunluğun artması, büyük oranda asfalt kaplamalardan oluşan yol ağında daha yüksek gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu gerilmeler, kaplamalarda çatlama, yorulma, deformasyon ve su hasarı gibi bozulmalara yol açmaktadır.

Yeni yapılan veya yenilenen kaplamalar bozulmalara karşı daha dirençli tasarlanmaktadır. Bu amaçla, güncel kaplama teknikleri kullanılabilir veya gelişmiş katkı maddeleri tercih edilebilmektedir (Katanalp vd., 2019). Malzeme seçimi ve karışım tasarımı kaplamadan beklenen performansın oluşmasında anahtar rol oynamaktadır. Örneğin, literatürde (Karahancı vd., 2018), karışım tasarımında kullanılan karıştırma ve sıkıştırma gibi aşamaların uygulama koşullarına benzerlik göstermesi gerektiğine vurgu yapılmaktadır. Ancak kaliteyi garanti altına alan süreçlerden birisi de inşaa aşamasıdır. Tasarlanan asfalt karışımının laboratuvar ile arazi performansı arasında yüksek ilişki olmalıdır. Yüksek dereceli ilişki, laboratuvar ve arazi donanımlarının benzer özelliklere sahip olması, eksiksiz bir inşaa yöntemi ve kalite - kontrol mekanizması ile mümkündür.

Kaplama malzemelerinin, ortamın, yapım ve yükleme sürecinin kaplama performansını etkilediği bilinmektedir. Bu parametrelerin her birinde gözlemlenen değişkenlik belirli bir risk seviyesi getirmektedir. Tasarım sürecindeki bu değişkenlikleri hesaba katmanın gereği dünyadaki birçok karayolu otoritesini tek bir girdi çıktı değerine dayanan geleneksel bir deterministik yaklaşımdan, ortalama varyans ve olasılık dağılımı içeren olasılıkçı bir tasarıma yönelmektedir. Literatürde yer alan bir çalışmada, yapım süreci boyunca bu değişkenliklerin etkisi ve bunların kaplama ömrü üzerindeki etkileri olasılık dağılımı üzerinden ele alınmış, öngörülen yorulma ve deformasyon performansının değişkenliği üzerinde en büyük etkiye sahip olan parametrelerin asfalt kaplamanın rijitlik modülü, granül alt temel kalınlığı ve asfalt kaplama kalınlığı olduğu görülmüştür (Valle ve Thom, 2016).

Kaplama performansı, inşaat süreci ve yürürlükteki kalite kontrol prosedürlerinden kaynaklanan kaplama tabakası kalınlığındaki değişkenlik nedeniyle önemli ölçüde değişebilir. Yapılan bir çalışmada, bir otoyol kaplaması inşaatı için diğer tüm değişkenler sabit tutulurken kaplama kalınlığındaki değişkenliğin bir fonksiyonu olarak kaplamanın yorulma ömrü ve deformasyon potansiyeli değerlendirilmiş; kaplama kalınlığı yönetmelikte izin verilen tolerans değerleri arasında kalsa bile kalınlıktaki değişimlerin kaplama performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür (Valle ve Thom, 2020).

Karayolu inşaatında bir yol bölümü için belirli bir tasarım kalınlığı seçilmiş olsa bile uygulamada kalınlık inşaa sürecine bağlı nedenlerden genellikle sabit tutulamamaktadır. Kaplama tabakası kalınlığının hedeflenen kalınlığa yüksek oranda yakın bir dağılım göstermesi beklenir. Literatürde yer alan bir çalışmada, bir karayolunun 1000 m'lik bir bölümünde kaplama kalınlıkları yeraltı radarıyla ölçülmüş, asfalt kaplama kalınlığının yol boyunca değiştiği görülmüştür (Valle ve Thom, 2016).

Diğer bir çalışmada, farklı kalınlıklarda temel ve kaplama tabakaları ile deneme kesimleri inşaa edilmiş, asfalt kaplama ve temel tabakası kalınlığının yol yüzeyinde oluşan düşey deformasyonlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneme kesiminde, temel tabakası kalınlığı 20, 40 ve 60cm olarak, kaplama tabakası kalınlığı da 10, 15, 18 ve 20cm olarak uygulanmıştır. Kaplama tabakası kalınlığı sabit tutulduğunda temel tabakası kalınlığının artmasıyla düşey deformasyonun azaldığı ancak temel tabakası kalınlığı sabit tutulup asfalt kaplama kalınlığı arttığında deformasyon miktarının da arttığı görülmüştür (He ve Yang, 2018).

Asfalt karışımların mekanik özelliklerini değerlendirmede, örnek boyutu ve yükleme modeli yüksek öneme sahiptir (Mohmoodinia vd., 2016). Polonya da yapılan bir çalışma, asfalt karışım örnekleri üzerinde yapılan kırış eğilme testinin asfalt kaplamanın performansını değerlendirmede önemli sonuçlar verdiğini göstermiştir (Pszczola vd., 2018). Aynı çalışmada, bitüm kaynağının ve üretim sürecinin, asfalt karışımların düşük sıcaklık performansı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu ve bu etkinin bağlayıcı modifikasyonunun ve karışımında kullanılan agrega iskeletinin etkisiyle karşılaştırılabilir derecede önemli olduğu; aynı asfalt bağlayıcı ile üretilen farklı asfalt karışımların farklı düşük sıcaklık performansları sağlayabileceği ve yalnızca bitüm testine dayanan analizlerle düşük sıcaklık performansının sağlıklı bir şekilde değerlendirilemeyeceği ifade edilmiştir (Pszczola vd., 2018). Asfalt kaplamalarda, agreganın yüksek mukavemeti nedeniyle çatlama ihtimali asfalt mastiğin çatlama ihtimaline göre oldukça düşüktür. Çatlak oluşma biçiminin, kaplamanın çatlama davranışı üzerinde önemli bir

etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Asfalt kaplamaların çatlama davranışlarının araştırıldığı bir çalışmada, 29 cm uzunluğunda ve 5cm kalınlığında kiriş geometrilili asfalt kaplama örnekleri kullanılmış, 5°C sıcaklıkta ve 2 mm/dk yükleme hızında kiriş eğilme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, kaplama örneklerinde önceden gelişen çatlak yerinin ve şeklinin ve kaba agregada dağılımının örneklerin çatlama davranışını etkilediği, oluşan tüm çatlakların asfalt mastik içinde veya agregada mastik ara yüzeyinde geliştiği ancak agregaların üzerinden geçmediği görülmüştür (Yin vd., 2014).

Asfalt karışımların arazi ve laboratuvar performansları arasındaki ilişkinin kullanılan testlerle ortaya konulabilmesi asfalt kaplamaların arazi performansını garanti alan süreçlerden birisidir. Tekerlek izi testleri, sünme deneyleri, düşük sıcaklık çatlama deneyleri ve su hasarı deneyleri karışım özelliklerinin laboratuvarında değerlendirilmesinde kullanılabilir. Literatürde yer alan bazı çalışmalarda, hizmet vermekte olan bir karayolunun farklı bölümlerinde oluşan gerçek deformasyonlar ile aynı asfalt karışımın Hamburg tekerlek izi deneyi ile laboratuvarında bulunan değerleri karşılaştırılmıştır. Asfalt karışımların saha performansları ile Hamburg deney sonuçlarının uyumlu olduğu, Hamburg tekerlek izi deneyinin bitümlü sıcak karışımların saha performanslarının değerlendirilmesi için iyi bir simülasyon olduğu ifade edilmiştir (Walubita vd., 2020; Radhakrishnan vd., 2019).

Literatürde, karışım türü, tekerlek geçiş hızı, yükleme gerilmesi ve sıcaklık değişkenleri ile araştırmalar yapılmış; tekrarlı yük sünme testi sonuçlarının tekerlek izi deneyi ile benzerlik gösterdiği, her iki deneyden elde edilen grafiklerinin benzer olduğu, iki deneyden elde edilen sonuçlar arasında yüksek korelasyon olduğu görülmüştür (Zhu ve Fwa, 2006; Hussan vd., 2019). Tekrarlı yük sünme ve Hamburg tekerlek izi deneylerinin araziden alınan örneklerin performans seviyelerini ayırt edebildiği ve bu deneylerden elde edilen deformasyon değerlerinin, arazideki tekerlek izi performansının kabul edilebilir bir göstergesi olduğu ifade edilmektedir (Zhou vd., 2003).

Bu çalışmanın amacı, asfalt kaplama kalınlığının, kaplamanın performansı üzerindeki etkisinin kiriş örnekler kullanılarak, deformasyon kontrollü eğilme, tekrarlı-yük kontrollü eğilme ve Hamburg tekerlek izi deneyi ile değerlendirilmesidir. Arazi koşullarında gerçek silindir ile sıkıştırılmış asfalt karışım örnekleri kullanılarak, asfalt kaplamanın çatlama direnci, deformasyon ve su hasarı direnci yönünden değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Malzeme (Material)

Araştırmada, arazi koşullarında finişer ile serilip gerçek silindir ile sıkıştırılmış asfalt kaplama örnekleri kullanılmıştır. Kaplama örnekleri Trabzon ili, Of ilçesinden alınmıştır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) verilerine göre, Trabzon ilinin ortalama yıllık sıcaklığı 14.7°C, ortalama yağışlı gün sayısı 149.8 gün, aylık ortalama yağış miktarı 830mm ve ortalama günlük güneş alma süresi ise 4.5 saat olarak verilmektedir (MGM, 2021). Kaplama örneklerinin alındığı yolda trafik sayım bilgisi bulunmamaktadır. Toplayıcı yol niteliğindeki yol kesiminden, yolun araçların kullanmadığı bölgesinden örnekler alınmıştır.

Tablo 1. Bazalt agregasının özellikleri (Properties of basalt aggregate)

AGREGA ÖZELLİĞİ	DEĞER
Aşınma Kaybı (%)	18.1
Hava Etkilerine Dayanıklılık (%)	1.43
Su Absorbsiyon % (Kaba Agregada)	0.64
Su Absorbsiyon % (İnce Agregada)	1.07
Yassılık İndeksi	19.2
Kaba Agregada Özgül Ağırlığı	2.785
Kaba Agregada Özgül Ağırlığı (Zahiri)	2.835
İnce Agregada Özgül Ağırlığı	2.770
İnce Agregada Özgül Ağırlığı (Zahiri)	2.855
Filler Özgül Ağırlığı (Zahiri)	2.871
Soyulmaya Karşı Mukavemet	
Katkısız Bitüm İle	40-45
Katkılı Bitüm İle	70-75

Kaplama tasarım bilgilerine üretici firma kayıtlarından ulaşılmıştır. Asfalt karışım üretiminde, 50/70 penetrasyon dereceli ve 1.035 özgül ağırlıklı asfalt çimentosu ile bazalt agregası kullanılmıştır. Bazalt agregasının özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Bazalt agregası (12-19mm), (5-12mm) ve (0-5mm) olarak üç grupta üretilmiştir. Aşınma tabakası için asfalt betonu tasarımında kullanılacak agrega gradasyonu Karayolları Teknik Şartnamesine (KGM, 2006) uygun olarak belirlenmiş, agrega tane boyutu dağılımı Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Tasarıma esas alınan tane boyutu dağılımı (Grain size distribution based on design)

ELEK AÇIKLIĞI MM	(12-19) MM GEÇEN %	(5-12) MM GEÇEN %	(0-5) MM GEÇEN %	KARIŞIM GEÇEN %	ŞARTNAME LİMİTİNE GÖRE (KGM, 2006) GEÇEN %
19.1	100	100	100	100	100
12.5	16.1	100	100	90.8	83-100
9.52	1.1	74.2	100	77.0	70-90
4.76	0.5	8.5	100	46.1	40-55
2.00		1.0	70	29.9	25-38
0.42		0.4	31.7	13.5	10-20
0.177			23.7	10.0	6-15
0.075			16	6.7	4-10

Asfalt karışım üretiminde, 50/70 penetrasyon dereceli ve 1.035 özgül ağırlıklı asfalt çimentosu kullanılmıştır. Karışım tasarımı ASTM D 1559 standardına göre Marshall metodu ile yapılmış ve optimum bitüm içeriği %5.20 olarak belirlenmiştir. Optimum bitüm içeriğindeki karışım özellikleri Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Asfalt karışımın optimum bitüm içeriğindeki mühendislik özellikleri (Engineering properties of the asphalt mix in optimum bitumen content)

KARIŞIM ÖZELLİĞİ	DEĞER
Optimum Bitüm Oranı, %	5.20
Boşluk, %	4.00
Pratik Yoğunluk, gr/cm ³	2.493
Asfaltla Dolu Boşluk, %	73
Akma, mm	3.0
VMA, %	14.85
Stabilite, kg	1465

Tasarımı yapılan asfalt karışımlar, arazi koşullarında serilip sıkıştırıldıktan sonra 8 yıl hizmet etmiştir. Asfalt kaplama örnekleri laboratuvarında değerlendirilmek üzere yol yüzeyinden, araçların az kullandığı yol kenarından, örselenmeden kesilerek alınmıştır. Örnekler, standart boyutlarda kesilmeden önce ve kesildikten sonra dikkatlice incelenmiş, hasarlı oldukları düşünülenler elenerek sonraki deneylerde kullanılmamıştır. Literatürde (Batioja-Alvarez, 2020), özellikle Hamburg tekerlek izi deneyi için sahadan alınan örneklerin tıraşlanması önerilmektedir. Bu nedenle, tıraşlama işlemi kaplama örneğinin alt yüzeyine yapılmıştır. Örnekler, uzunluğu 36cm, genişliği 10cm olacak şekilde asfalt testeresi ile ıslak kesim yapılarak hazırlanmıştır. Kaplama kalınlıkları 4cm'den 9cm'ye kadar 0.5cm aralıklarla artış olacak şekilde ayarlanmıştır. Hazırlanan giriş örneklerden bir görüntü Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Farklı kalınlıklarda hazırlanan asfalt kaplama örnekleri (Asphalt mixture samples prepared in different thicknesses)

2.2. Yöntem (Method)

Çalışmada farklı kalınlıklardaki asfalt kaplama kiriş örnekleri kullanılarak Hamburg tekerlek izi deneyi, deformasyon kontrollü kiriş eğilme deneyi ve tekrarlı yük kontrollü eğilme deneyi uygulanmıştır.

2.2.1. Hamburg Tekerlek İzi Testi (Hamburg Wheel Tracking Test)

Hamburg tekerlek izi testi, araziden alınmış veya laboratuvar ortamında üretilmiş asfalt kaplama örneklerinin tekerlek izi ve su hasarı direncini belirleyen tahribatlı bir yöntemdir. Örnekler kuru ortamda veya su dolu hazne içerisinde test edilebilmektedir. Deney kabini veya su haznesi istenilen sıcaklığa ayarlanabilmektedir. Deneylerde, sahadan alınmış ya da laboratuvar ortamında üretilmiş silindirik veya dikdörtgen geometrili örnekler kullanılabilir. Deney aleti için özel tasarlanmış kalıpların içerisine yerleştirilen kaplama örneklerinin üzerinden deney aletinin çelik tekerleklerinin belirlenen periyottaki geçişleriyle deney yapılmaktadır. Literatürde, deneyin su içerisinde yapılması durumunda, deneyin hem tekerlek izi hem de su hasarı değerlendirmesine olanak sağladığı ifade edilmektedir (Lu ve Harvey, 2006). Deney yöntemi, çeşitli asfalt karışımların su hasarı ve tekerlek izinin birleştirilmiş etkisini ölçebildiği ve hızlı ve güvenilir sonuçlar sunduğu için popülerlik kazanmıştır (Yıldırım vd., 2007).

Hamburg tekerlek izi deneyi sonucunda oluşturulan deformasyon eğrisi grafiğinden dört değer elde edilebilmektedir: ilk sıkışma, sünme eğimi, soyulma büküm noktası ve soyulma eğimi (Yıldırım ve Kennedy, 2001). Tekerlek, örnek üzerinde ilk 1000 geçiş ile karışımı yoğunlaştırır, bu süre içerisinde oluşan deformasyon ilk sıkışma olarak kabul edilir. İlk sıkışmadan sonra başlayan, deformasyon eğrisinin lineer olduğu bölge sünme eğimi olarak adlandırılır. Sünme eğiminden sonra oluşan ikinci lineer bölge soyulma eğimi olarak adlandırılır. Bu eğim su hasarı nedeniyle oluşan kalıcı deformasyon birikimini ölçmektedir. Soyulma eğimi soyulma başlamasıyla 1 mm'lik iz oluşturmak için gerekli tekerlek geçiş sayısını temsil etmektedir. Bu eğim su hasarının şiddeti ile ilişkilidir. Eğimin büyük olması soyulmanın şiddetli olduğu anlamına gelmektedir. Sünme eğimi ve soyulma eğimine çizilen teğetlerin kesişme noktasına denk gelen tekerlek geçiş sayısı da soyulma büküm noktası olarak ifade edilir. Bu nokta soyulmanın başladığı geçiş sayısını vermektedir. Soyulma büküm noktası değerinin yüksek olması soyulma direncinin fazla olduğunu göstermektedir (Yıldırım ve Kennedy, 2001).

Deney aynı anda iki numune üzerinde gerçekleştirilebilmektedir. Deneyde 15 ila 30cm çaplarında silindirik örnekler kullanılabildiği gibi 30 cm X 36 cm boyutlarında plak örnekler de kullanılabilir. Test sıcaklığı 25°C ile 75°C arasında çeşitlilik göstermesine rağmen geleneksel olarak 50°C'de gerçekleştirilmektedir. Cihazda 47mm genişliğindeki çelik tekerlekler numunelere 705N'luk yük uygulamaktadır.

Bu çalışmada, Hamburg tekerlek izi testi AASHTO T 324 prosedürüne göre, 4cm ile 9cm aralığında 0.5cm artışla hazırlanan 11 farklı kalınlıktaki kiriş örneklere (genişlik: 10cm, uzunluk: 36cm) yapılmıştır. Asfalt kiriş örneğinin deney sırasında kalıp içerisinde hareket etmesini önlemek için Şekil 2'de görüldüğü gibi asfalt kirişin her iki tarafına ahşap destek kirişleri konulmuş ve kalıbın sıkıştırma sistemi ile sıkıştırılmış ve sabitlenmiştir. Deneyde, Tablo 4'te verilen parametreler seçilmiştir.



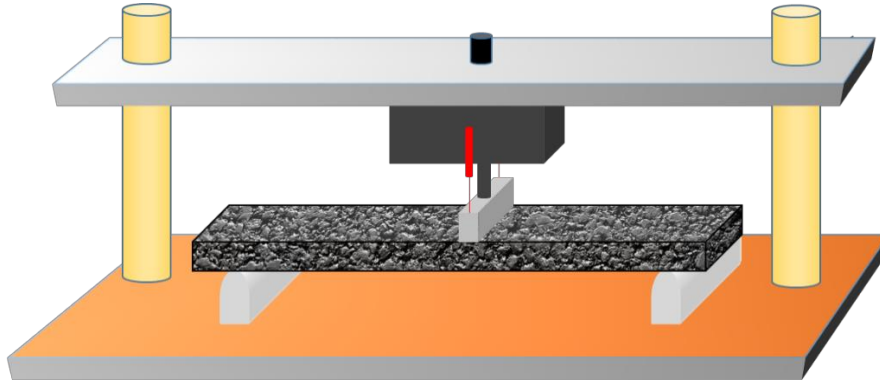
Şekil 2. Hamburg tekerlek izi deney düzeneği (Hamburg wheel tracking test device)

Tablo 4. Hamburg tekerlek izi deneyinde uygulanan parametreler (Parameters applied in the HWTT)

DENEY ÖLÇÜTÜ	DEĞER
Deney Sıcaklığı (°C)	50
Deneyi Sonlandıran Tekerlek İzi Derinliği (mm)	15
Tekerlek Geçiş Hızı (Döngü/Dakika)	26
Maksimum Geçiş Sayısı	10000
Suda Bekletme Süresi (dak.)	30
Koşullandırma Tekerlek Geçiş Sayısı	5

2.2.2. Deformasyon Kontrollü Üç Nokta Kiriş Eğilme Testi (Deformation Controlled Three Point Beam Bending Test)

Düşük sıcaklıkların etkisi altında kaplamada karmaşık bir gerilme durumu oluşur ve düşük sıcaklıktaki çatlaklar esas olarak asfalt tabakalarındaki bu çekme gerilmelerinden kaynaklanır. Kiriş eğilme deneyi, asfalt kaplamalarda oluşan gerilme durumunun doğrudan temsili anlamına gelmez ancak çoğunlukla test edilen asfalt karışımlarının düşük sıcaklıktaki reolojik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Sistemin önemli bir avantajı karmaşık bir düzeneğin olmayışı ve deneyin çoğu ulaştırma laboratuvarında yapılabilecek olmasıdır (Pszczola vd., 2018). Deney düzeneğinin şematik bir gösterimi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Kiriş numunelerin yükleme mekanizması (Loading mechanism of beam samples)

Bir karışımın kırılma dayanımı, çatlak yayılmasına dayanma kabiliyetini karakterize eder ve karışımın kırılma performansının bir göstergesidir. Kırılma dayanımının yüksek olması karışımın çatlama karşı direncinin de yüksek olduğu anlamına gelmektedir (Behbahani vd., 2013; Marasteanu vd., 2002).

Asfalt karışımların değerlendirilmesi için kiriş eğilme deneyi ilk olarak Jucycki (Judycki 1990) tarafından kullanılmış daha sonra yöntemin geliştirilmiş versiyonları (Judcycki vd., 2001; Jaczewski vd., 2016) literatüre sunulmuştur. Bu çalışmada deney parametreleri modifiye edilmiş yöntemlere göre, literatürde yer alan çalışmalar da (Pszczola ve Szydowski, 2018; Abdelsalam vd., 2020) göz önüne alınarak belirlenmiştir. Kalınlığı 4cm ile 9cm arasında değişen asfalt kaplama kiriş örneklerine kiriş eğilme deneyi yapılmıştır. Mesnetler arası mesafe 30cm

olarak ayarlanmıştır. Deney Marshall stabilite cihazında 25°C sıcaklıkta, 50.8mm/dak. yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Cihazın sabit hızda hareketi deformasyon kontrolü sağlamaktadır.

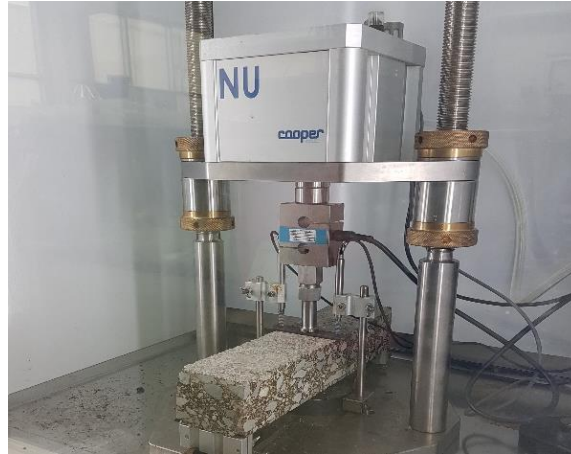
Kiriş örneklerin eğilme dayanımları Formül (1) ile hesaplanmaktadır. Burada; σ : kirişin eğilme dayanımı (kN/mm²), F: kırılmaya neden olan yük (kN), l: kirişin mesnetler arası mesafesi (mm), b: kirişin genişliği (mm), h: kirişin kalınlığı (mm)'dir.

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (1)$$

2.2.3. Tekrarlı-Yük Kontrollü Üç Nokta Kiriş Eğilme Testi (Repeated-Load Controlled Three Point Beam Bending Test)

Tekrarlı yük deneyi bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı direncini değerlendirmede kullanılmaktadır. Asfalt karışım örneği üzerine belirlenen periyotta tekrarlı yükleme uygulanmaktadır. Test sonucunda kalıcı deformasyonlar kümülatif bir şekilde kaydedilerek yükleme sayısı deformasyon grafiği oluşturulmaktadır. Farklı sıcaklık, gerilme, yükleme periyodu ve test süresinde yapılabilen test gerçek arazi koşullarındaki tekerlek izini yansıtmada arazi koşulları ile uyumlu sonuçlar vermektedir (İskender, 2008).

Gerilme kontrollü kiriş eğilme deneyi, üniversal asfalt test cihazında, tekrarlı yük sünme testi yazılımı ile 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneyde 36cm uzunluğunda, 10cm genişliğindeki kiriş örnekler 4cm ile 9cm aralığında farklı kalınlıklarda hazırlanarak kullanılmıştır. Mesnetler arası mesafe 30cm ayarlanmıştır. 0.3kN koşullama yükü, 2 dakika koşullama süresi, 5kN yük, yüklü ve yüksüz süre 500ms ve 20mm deneyi sonlandıran deformasyon seçeneği uygulanmıştır. Deney düzeneği Şekil 4'te gösterilmiştir.



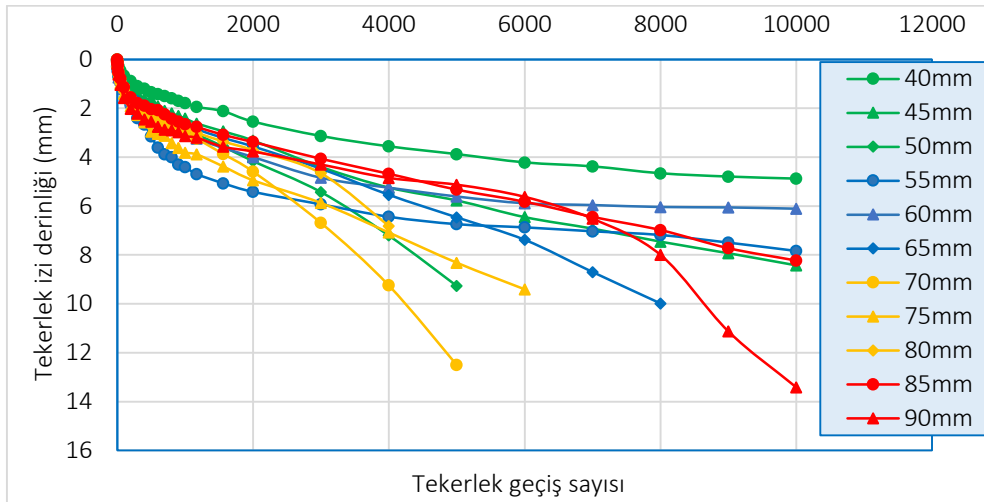
Şekil 4. Tekrarlı-yük kontrollü kiriş eğilme deneyi düzeneği (Repeated-load controlled beam bending test setup)

3. Bulgular ve İrdeleme (Findings And Discussion)

3.1. Hamburg Tekerlek İzi Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation Of HWTT Results)

Hamburg tekerlek izi testi, bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon ve soyulma etkisine karşı gösterdikleri direnci değerlendirmek için kullanılmıştır. Deney, su içerisinde, 50°C sıcaklıkta, 10000 tekerlek geçişi döngüsünde, kiriş örnek çiftlerine AASHTO T324 standardına göre yapılmıştır. Deney sonuçları, iki örnekten (sol-sağ tekerlek) elde edilen değerlerin ortalaması alınarak Şekil 5'de gösterilmiştir.

Şekil 5 irdelendiğinde, istisnalar olmakla birlikte, genel olarak kaplama kalınlığının atması ile birlikte deformasyon miktarlarının da arttığı görülmüştür. Düşük kaplama kalınlıklarında, deformasyon eğrisinin ikinci bölgesindeki eğimin daha düşük olduğu, yani ince kaplama örneklerinin deformasyon miktarlarının daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum ince örneklerde toplam sıkışma miktarının daha düşük olması, kaplama kalınlığı arttıkça kaba agregaların karışım içerisinde daha kolay yer değiştirebilmesi ile tekerlek altındaki sıkışmanın daha kolay gerçekleşebilmesi ile açıklanabilir.



Şekil 5. Kaplama kalınlığı - tekerlek izi derinliği ilişkisi (Pavement thickness & rutting interaction)

İnce kaplamalarda, deformasyon eğrilerinde soyulma büküm noktaları gözlemlenmemiş, kaplama kalınlığı arttıkça soyulma büküm noktaları da belirginleşmiştir. 65mm ve daha kalın kaplama örneklerinde soyulma büküm noktaları oluşmuştur. Buna rağmen, 65mm ve 80mm kalınlığındaki örneklerde soyulma büküm noktası daha düşük çıkmıştır. 90mm kalınlıklı örneklerde tipik Hamburg tekerlek izi deney eğrisi görülmüştür. Su hasarının kaplamanın permeabilitesi ile ilişkili olduğu bilinmektedir. Kaplamadaki boşluk oranının atmosferi geçirgenliği artırmaktadır. Literatürde yapılan bir çalışmada, saha koşullarında, kaplama kalınlığı arttıkça kaplama yoğunluğunun tasarım yoğunluğunun üzerinde olmasına rağmen azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür (İskender, 2019). Bu nedenle, daha kalın kaplamalarda soyulma büküm noktalarının daha düşük çıkmış olabileceği değerlendirilmektedir. Örneklerin gerçek yol yüzeyinden alınmış olması görsel değerlendirmelerde görülememiş olsa bile örneklerde içsel çatlakların olma riskini beraberinde getirmektedir. Karışımın serilip sıkıştırma aşamasındaki agrega segregasyonu veya termal segregasyon gibi olası farklılıklar örnek alınması sırasında değerlendirilememektedir. Bu nedenle deney sonuçlarında farklılıklar görülebilmektedir. Genel eğilimi bozan, 65mm kalınlıktaki sonuçlar bu anlamda yorumlanabilir.

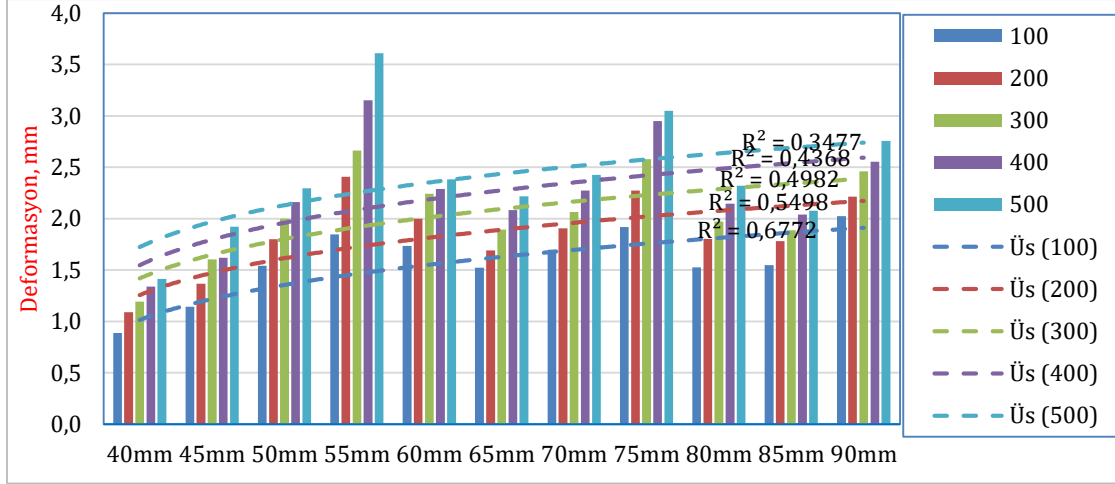
Colorado Ulaştırma Departmanı (CDOT), asfalt karışımın tekerlek izine karşı dirençli olarak nitelendirilebilmesi için 20000 tekerlek geçişinde 10mm'den daha az tekerlek izi oluşması gerektiğini öngörmektedir. CDOT'a göre, aynı zamanda 10000 tekerlek geçişinde deformasyon miktarının 4mm'den daha küçük olması gerekmektedir (Beecroft ve Petho 2015). Bu çalışmada kullanılan örnekler tekerlek izine karşı düşük dirençli olarak değerlendirilmektedir. Hamburg tekerlek izi deneyi sonuçları üzerinde etkili olan faktörlerin değerlendirildiği çalışmada, deney sonuçlarının agrega kalitesi, asfalt çimentosu rijitliği, yaşlanma süresi, rafinerizasyon süreci, sıvı soyulma önleyici katkıları, sönmüş kireç katkısı ve sıkıştırma sıcaklığına hassas olduğu görülmüştür (Aschenbrener, 1995). Kullanılan asfalt karışım örneklerinin doğal yaşlanma sürecinden dolayı düşük performans sergilediği değerlendirilmektedir.

Hamburg tekerlek izi deneyinde, metal tekerleğin asfalt kaplama örneği üzerinde ileri-geri hareket etmesi kaplama örneğinde deformasyona yol açmaktadır. Bu deformasyon, tekerlek altındaki kısımda yoğunluk artışı, kaba agregaların karışım içerisinde yeniden yerleşmesi/yer değiştirmesi, karışım içerisindeki malzemenin yanıl hareketi gibi sebeplerden gerçekleşmektedir. Kaplama kalınlığı arttıkça deformasyon miktarı da sıralanan nedenlerden dolayı artmaktadır.

Kullanılan deney parametreleri altında, farklı karışımları değerlendirirken, belirli tekerlek geçiş sayılarına ulaşılabilmesi ve karışımların birbirinden deformasyon ve su hasarı direnci açısından daha hassas olarak değerlendirilebilmesi açısından 65mm'den daha ince örneklerin kullanılması gerektiği düşünülmektedir. Daha kalın örnekler kısa sürede sınır deformasyon değerine ulaştığından deney sonlanmaktadır. Örnek kalınlığı çok azaltıldığında ise karışımlarda oldukça düşük deformasyonlar gerçekleştiğinden farklı karışımlar arasında performans gözlemlerinin ayırtılmasında zorluklar oluşabilir.

Hamburg tekerlek izi deneyinde, deney sonuçlarının örnek kalınlıklarına hassasiyetinin irdelendiği bir çalışmada daha ince kaplamalardan ziyade 60mm kalınlığındaki örneklerin kullanılması önerilmektedir (Dai vd., 2020). Deney sonuçlarında 65mm'den daha kalın örneklerde soyulma davranışı daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Bu açıdan çalışma literatürle uyumlu görülmektedir. Şekil 6'da, 100, 200, 300, 400 ve 500 tekerlek geçiş döngülerinde oluşan deformasyonlar kaplama kalınlığına bağlı olarak gösterilmiştir. Aynı zamanda kaplama kalınlığı ile deformasyon arasındaki ilişki regresyon analizi ile 100, 200, 300, 400 ve 500 tekerlek geçiş döngüsünde ayrı ayrı

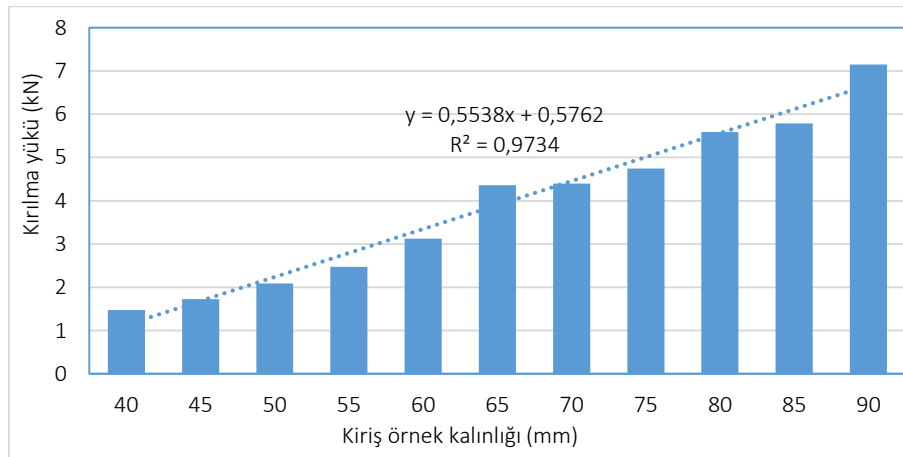
hesaplanmıştır. Kaplama kalınlığı ile deformasyon arasındaki en kuvvetli ilişki üstel fonksiyonda ve 100 tekerlek geçişi döngüsünde ($R^2=0.6772$) oluşmuştur. Tekerlek geçiş sayısı arttıkça ilişkinin kuvveti de azalmaktadır. Bu genelleme daha yüksek tekerlek geçiş sayılarında da geçerlidir. Ancak grafiğin anlaşılabilirliğinin azalmaması için yalnızca en yüksek uyumun olduğu düşük geçiş sayıları gösterilmiştir. Bazı örneklerde soyulma büküm noktaları daha erken görülmektedir. Soyulma büküm noktasından sonra, kaplama örneklerinde oluşan toplam deformasyon daha hızlı artmaktadır. Bazı örneklerde, soyulma davranışına bağlı olarak hızlı deformasyon artışının yüksek tekerlek geçişlerinde deformasyon ile kaplama kalınlığı arasındaki ilişkinin kuvvetini azalttığı düşünülmektedir.



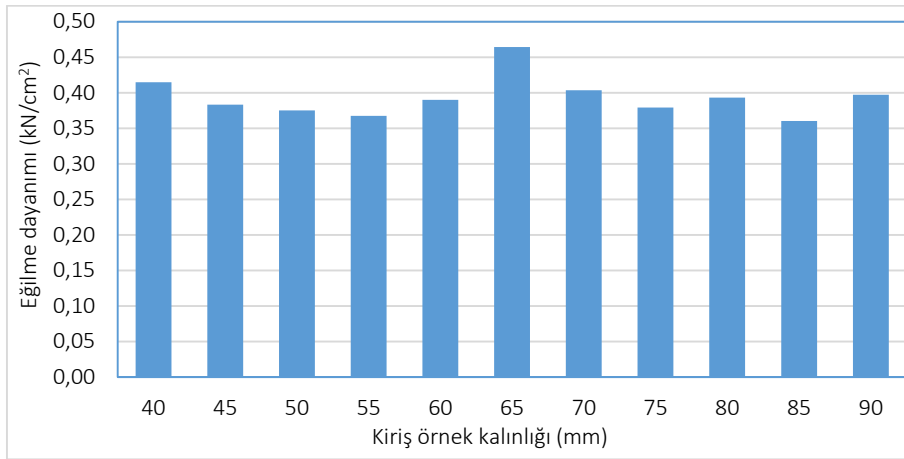
Şekil 6. Kaplama kalınlığı - deformasyon arasındaki korelasyon (Correlation between pavement thickness and rutting)

3.2. Deformasyon Kontrollü Kiriş Eğilme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation Of Deformation-Controlled Beam Bending Test Results)

Üç nokta-deformasyon kontrollü kiriş eğilme deneyi Marshall stabilite cihazında 40mm ile 90mm kalınlığındaki asfalt kaplama örneklerine yapılmıştır. Her bir kalınlık için üç asfalt kaplama örneği test edilmiştir. Deney sonuçları, üç örneğin ortalaması alınarak Şekil 7'de ve hesaplanan eğilme dayanımları da Şekil 8'de, gösterilmiştir. Kiriş örneklerin kırılma sürecinde kaydedilen maksimum yükün kalınlıkla birlikte arttığı görülmüştür. Kaplama kalınlığı ile kırılma yükü arasındaki ilişki regresyon analizi ile araştırılmış, yüksek regresyon katsayısı ($R^2=0.9734$) elde edilmiştir. Sonuçlar kaplama kalınlığı ile eğilme deneyinde kırılmaya yol açan yük arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir.

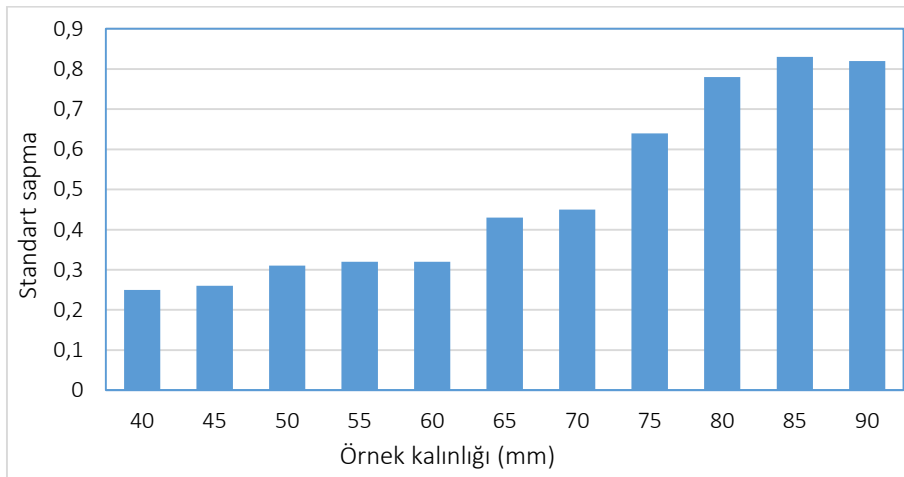


Şekil 7. Kaplama kalınlığı- kırılma dayanımı ilişkisi (Pavement thickness - fracture strength relationship)



Şekil 8. Eğilme dayanımı – kaplama kalınlığı ilişkisi (Bending strength-pavement thickness relationship)

Deney sonuçlarının standart sapmaları hesaplanarak Şekil 9'da verilmiştir. Örnek kalınlığının artması kırılma yüklerinin standart sapmalarını artırmıştır. 60mm'nin altındaki kalınlıklarda standart sapmalar arasında önemli farklılıklar oluşmamıştır. 65mm kalınlıktan itibaren standart sapmalar da hızlı artış eğilimi göstermiştir.



Şekil 9. Kırılma yüklerinin standart sapma dağılımı (Standard deviation of fracture load of samples)

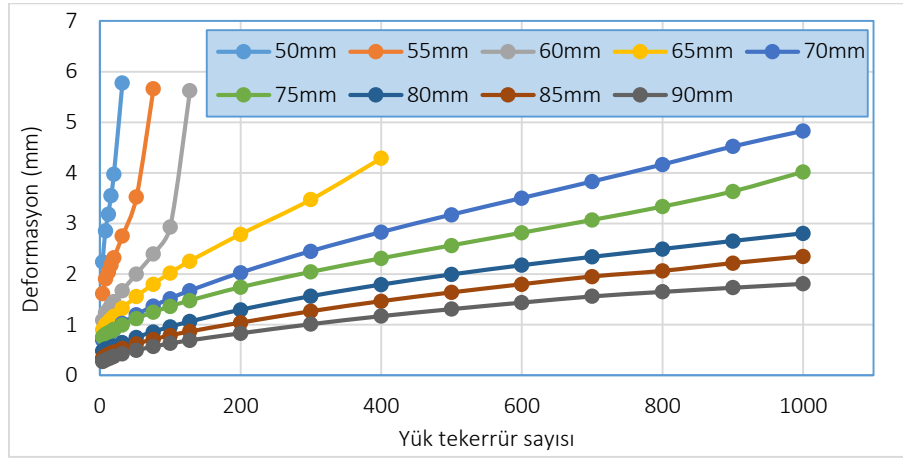
Çatlama direncinin göstergesi olan eğilme dayanımının 0.36-0.46kN/cm² aralığında değiştiği görülmektedir. Kaplama örneklerinin eğilme dayanımları 55 mm'den 65mm kalınlığa kadar artmış, 65mm kalınlıkta en yüksek değere ulaşmıştır. 65mm ile 75mm arasında eğilme dayanımı azalış göstermiştir. Kaplamanın eski olması, trafik altında ilave sıkışmalarla birlikte kaplama yoğunluğunun farklı noktalarda artması, her ne kadar örnek hazırlama aşamasında dikkatli seçim yapılsa bile örneklerde gözle görülmeyecek kılcal çatlakların olma ihtimali eğilme dayanımlarının değişim eğilimindeki farklılıkların nedeni olabileceği değerlendirilmektedir.

3.4. Tekrarlı-Yük Kontrollü Kiriş Eğilme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation of Repeated-Load Controlled Beam Bending Test Results)

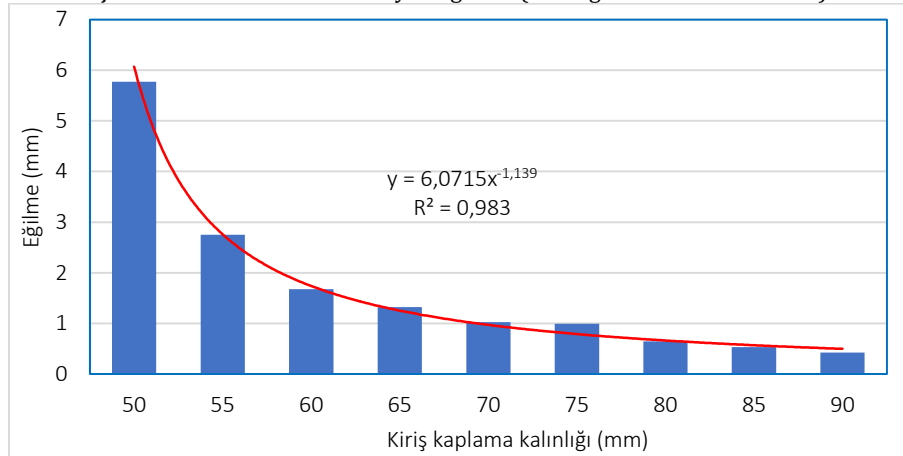
Tekrarlı - yük kontrollü kiriş eğilme deneyi asfalt kaplama kiriş örneklerine uygulanmıştır. Farklı kalınlıklarda ikişer örnek üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen deformasyon eğrileri Şekil 10'da gösterilmiştir. 40mm ve 45mm kalınlıktaki örnekler çok düşük yük tekrerrür sayılarında kırıldıklarından Şekil 11'de gösterilmemiştir. Kalınlık arttıkça eğilme deformasyonu azalmakta ve kırılma için gereken yükleme sayısı artmaktadır. 60mm'den daha düşük kalınlıktaki örnekler 100 yükleme döngüsüne ulaşmadan kırılmıştır. Aynı yükleme sayılarında (50mm kalınlıktaki örneğin kırıldığı yükleme sayısı olan 32 yükleme döngüsü), eğilme deformasyonu – kalınlık ilişkisi Şekil 13'te verilmiştir. Örnek kalınlığı-eğilme deformasyonu eğrisinin eğimi başlangıçta çok yüksek iken 60mm kalınlıktan sonra eğimin azaldığı görülmektedir. Bu sonuç, 60mm'den daha düşük kalınlıklarda eğilme davranışının örnek kalınlığına son derece hassas olduğunu ancak kalınlık arttıkça bu hassasiyetin azaldığını göstermektedir.

Kalınlık arttıkça kaplamada çatlama neden olan çekme gerilmelerinin azaldığı, düşük kalınlıklarda kaplamanın aşağıdan yukarıya çatlamalara daha hassas iken kalınlık arttıkça yukarıdan aşağıya çatlamalara daha hassas hale

geldiği literatürden bilinmektedir (Mackiewicz, 2018). Eğilme davranışının kaplamanın çekme direncinin de göstergesi olduğu düşünüldüğünde, özellikle 60mm'den daha kalın tabakalarda çekme direncinin yüksek olduğu, 60mm'nin altındaki kalınlıklarda da çekme direncinin buna bağlı olarak ta çatlama direncinin hızla azaldığı söylenebilir.



Şekil 10. Ortalama deformasyon eğrileri (Average deformation curves)



Şekil 11. 32 yüklem döngüsünde eğilme deformasyonu - kaplama kalınlığı ilişkisi (Bending deformation at 32 loading cycles - pavement thickness relationship)

Kiriş eğilme deneyi; çekme, basınç ve kayma tepkisinin kombinasyonunu içerdiği için kompozit malzemelerin test edilmesinde çok yönlü bir yöntemdir. Eğilme mukavemeti ile numunenin açıklık-kalınlık oranı arasında teorik olarak doğrudan bir ilişki vardır. Klasik kiriş teorisine göre eğilmede numunenin dış katmanlarında maksimum seviyeye ulaşan çekme ve basınç gerilmeleri oluşmakta, kirişin merkezinde ise maksimuma ulaşan kesme gerilmesi oluşmaktadır. Eğilmeye maruz kalan bir kirişin kırılma biçimi açıklık-kalınlık oranına bağlıdır. Asfalt kiriş örneklerinin eğilme davranışları üzerinde açıklık, genişlik ve kalınlık parametreleri anahtar rol oynamaktadır. Kiriş açıklığı ve genişliği sabit tutulup kalınlık değiştirildiğinde açıklık/kalınlık (l/h) oranının artması eğilme deformasyonunu arttırmakta fakat numunenin kırılmasına neden olan maksimum yükü azaltmaktadır (Racz ve Vas, 2005).

Eğilmeye maruz kalan asfalt kaplamada çatlaklar görülmeye başladıktan sonra su bu çatlaklardan içeriye girerek kaplamanın bozulmasını hızlandırmaktadır. Bu sebeple asfalt karışımların eğilmede çatlama davranışlarını incelemek önemlidir (Xu vd., 2020).

Asfalt kaplamanın hem kaplama yüzeyinden alta doğru hem de alttan kaplama yüzeyine doğru çatlama davranışı, karışım aynı olsa bile yoğunluk ve kaplama kalınlığından önemli derecede etkilenmektedir (Ghos, 2020). Daha kalın kaplamalar genellikle çatlama ve yorulmalara karşı daha yüksek direnç göstermektedirler (Wagoner et al., 2005; Zhang 2015). Kalınlığın artmasıyla düktilite azalmakta ve çatlama neden olan kırılma için gereken enerji artmaktadır. Bu çalışmada bulunan sonuçlar literatürle uyumlu olarak değerlendirilmektedir. Örnek kalınlıkları arttıkça, deformasyon kontrollü eğilme deneyinde kırılma yükünün arttığı ve tekrarlı yük kontrollü eğilme deneyinde de deformasyonu azalmıştır.

Hamburg Tekerlek izi deneyi için çoğunlukla 60mm kalınlığında örnekler tercih edilmektedir. Literatürde yapılan bir çalışmada (Dai vd., 2020), laboratuvarında hazırlanan aynı asfalt karışım Hamburg tekerlek izi deneyi ile farklı kalınlıklarda test edilmiş, HWTT için 60 mm örnek kalınlığının daha uygun olduğu önerilmiştir. 40 mm kalınlıktaki örnekler üzerinde tekerlek izi derinliğinin kesintili bir şekilde dağıldığı (tekerlek izinde süreklilik oluşmadığı) ifade edilmiştir. Üstelik sıkıştırma derecesinin (yoğunluk) kalite kontrol ve tekerlek izi derinliğini etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu belirtilmiştir. Bir diğer çalışmada da (Zhu vd., 2017), sıcak karışım asfaltlarda oluşan deformasyonların yük ve kaplama kalınlığına boşluk içeriğinden daha hassas olduğu vurgulanmıştır.

Bu çalışmada, 40 mm ile 90mm arasındaki kalınlıklarda örnekler kullanılmıştır. Hamburg tekerlek izi deneyinde düşük kalınlıklarda daha az deformasyonların oluştuğu, kalınlık arttıkça deformasyonların da arttığı görülmüştür. İnce kaplamalarda, deney sırasında tekerlek geçişleri ile birlikte örnekler sıkışmaya devam etmekte ve sıkışmadan dolayı toplam deformasyon miktarı artmaktadır. Kalın örneklerde toplam sıkışma arttığından deformasyon miktarı da daha fazla oluşmaktadır. Deneyde uygulanan sıcaklığın etkisiyle bir süre sonra karışımın esnekliğinin artması deformasyon oluşum hızını artırmaktadır. Bu nedenle kalın örneklerde soyulma davranışlarının daha açık görülebildiği değerlendirilmektedir.

Hamburg deneyinde asfalt karışımların tekerlek izi direnci değerlendirilirken, deformasyon eğrisinde ilk sıkışmadan sonra oluşan lineer bölgenin eğiminden yararlanılmaktadır. Eğim ne kadar düşük olursa karışımın tekerlek izi direnci o kadar yüksek olarak değerlendirilmektedir. Ancak karışımların sağlıklı bir karşılaştırmaya tabi tutulabilmesi için Hamburg tekerlek izi deneyinde örnek kalınlıklarının sabit tutulması son derece önemli görülmektedir. Bununla birlikte yapılan deneylerde ince örnekler kullanıldığında (40 mm -50mm) hem toplam deformasyon miktarı çok düşük çıkmakta hem de örnek üzerindeki tekerlek izi derinliği süreklilik göstermemektedir. Kalınlığın yüksek olması da standart sapmanın artmasına sebebiyet vermektedir. Bu nedenle, sabit örnek kalınlığı seçmek koşulu ile 55 - 65mm kalınlığındaki örneklerin kullanılmasının daha uygun olduğu düşünülmektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler (Conclusions and Recommendations)

Bu çalışmada arazi koşullarında üretilmiş asfalt kaplamadan alınan karışım örnekleri Hamburg tekerlek izi deneyi, deformasyon kontrollü giriş eğilme deneyi ve tekrarlı-yük kontrollü giriş eğilme deneyleri ile test edilmiştir. Araştırmada 40-90mm kalınlığındaki giriş örnekler kullanılmıştır. Bulunan sonuçlar deformasyon, su hasarı ve çatlama direnci yönünden değerlendirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Hamburg tekerlek izi deneyi sonuçlarından, örnek kalınlığının artması ile deformasyon miktarının da arttığı, 40-50mm gibi düşük kalınlıklarda soyulma noktasının oluşmadığı, yüksek kalınlıklarda soyulma davranışının daha net olduğu görülmüştür. Ancak ince kaplama örneklerinde tekerlek izi derinliğinin düzgün dağılmadığı belirlenmiştir.

Eğilme deneylerinde, kaplama kalınlıklarının artması ile kırılmaya neden yükün buna bağlı olarak ta çatlama direncinin de arttığı görülmüştür. Kaplama kalınlığı ile kırılma yükü arasında yüksek ilişki elde edilmiştir. Fakat kaplama kalınlığının artması deney sonuçlarının standart sapmasını artırmıştır.

Karışımların daha sağlıklı olarak değerlendirilebilmesi için, sabit bir kalınlık seçilmesi koşulu ile 55-65mm arasındaki kalınlıkların kullanılmasının daha ince ve daha kalın örneklerle göre daha uygun olduğu değerlendirilmektedir.

Sonraki çalışmalarda, daha geniş örnek grubu ile 55-65mm arasındaki kalınlıklarda, karışım yoğunluğunu kontrol altına alarak araştırmalar yapılabilir. Karışımın agregata iskeleti yapısının etkisinin de ortaya koyulması açısından farklı karışım türleri üzerinde araştırma yapılabilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Abdelsalam, M., Yue, Y., Khater, A., Luo, D., Musanyufu, J., Qin, X., 2020. Laboratory study on the performance of asphalt mixes modified with a novel composite of diatomite powder and lignin fiber. *Applied Sciences*, 10, 16, 5517.
- Aschenbrenner, T. 1995. Evaluation of Hamburg wheel tracking device to predict moisture damage in hot-mix asphalt. *Transportation Research Record* 1492, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 193-201.

- Batioja-Alvarez, D., Lee, J., Rahbar-Rastegar, R., Haddock, J. E., 2020. Asphalt mixture quality acceptance using the Hamburg wheel-tracking test. *Transportation Research Record*, 2674, 8, 338-349.
- Beecroft, A., Petho, L., 2015. Commissioning of Hamburg wheel tracking device (HWTDT), Final Report. Proje, 007180.
- Behbahani, H., Mohammad Aliha, M.R., Fazaeli, H., Aghajani, S. Experimental fracture toughness study for some modified asphalt mixtures. *Adv. Mater. Res.* 2013, 723, 337-344.
- Dai, X., Jia, Y., Wang, S., Gao, Y., 2020. Evaluation of the rutting performance of the field specimen using the Hamburg wheel-tracking test and dynamic modulus test. *Advances in Civil Engineering*.
- Ghos, S., 2020. Evaluation of causes of transverse and fatigue cracking in flexible pavements using laboratory and field testing and PMED simulation. Master of Science, University of Oklahoma Norman, Oklahoma.
- He, D., Yang, W., 2018. Effect of thickness of gravel base and asphalt pavement on road deformation, *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1-7.
- İskender, E., 2008. Koşullandırma sistemlerinin geleneksel ve modifiye asfalt karışımlar üzerindeki etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Jaczewski, M., Judycki, J., Jaskuła, P., 2016. Low-temperature properties of high modulus asphalt concrete (ACWMS) in three-point bending test. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 33, 217-224.
- Judycki, J., 1990. Bending test of asphaltic mixtures under static loading. In *Proceedings of the 4th International Symposium on the Role of Mechanical Tests for the Characterization*, Budapest, Hungary, 23-25 October 1990, 207-227.
- Judycki, J., Cyske, W., Pszczola, M., 2001. Strength and stiffness at low temperature of asphalt concrete of increased resistance to rutting. In *Proceedings of the VII International Conference, Durable and Safe Pavement Structures*, Kielce, Poland, 8-9 May 2001, 83-90.
- Karahançer, Ş., Erişkin, E., Çapalı, B., Saltan, M., Terzi, S., 2018. Superpave volumetric mix design of hot mix asphalt: case study of İsparta. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6, 1, 108-117.
- Katanalp, B. Y., Yıldırım, Z. B., Karacasu, M., İbrikçi, T., 2019. Atık kömür katkılı asfalt betonu performans karakteristiklerinin yapay sinir ağları ve merkezi kompozit tasarım yöntemleri kullanılarak karşılaştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7, 3, 680-688.
- KGM, 2006. Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu Teknik Şartnamesi, Yayın No: 267, KGM Yayınları, Ankara.
- Mackiewicz, P., 2018. Fatigue cracking in road pavement. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 356, 1.
- Mahmoodinia, N., Molayem, M., Fardealirezaei, A., 2016. Investigating the permanent deformation behavior of asphalt concrete mixtures in repeated load creep tests, In *International Conference on Transportation and Development*, 981-992.
- Marasteanu, M.O., Dai, S., Labuz, J.F., Li, X., 2002. Determining the low-temperature fracture toughness of asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 1789, 191-199.
- MGM, 2021. Meteoroloji Genel Müdürlüğü resmi web sitesi, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=undefined&m=TRABZON> (erişim tarihi: 10.08.2021)
- Pszczola, M., Jaczewski, M., Rys, D., Jaskuła, P., Szydłowski, C., 2018. Evaluation of asphalt mixture low-temperature performance in bending beam creep test. *Materials (Basel)*. 11(1):100.
- Pszczola, M., Szydłowski, C., 2018. Influence of bitumen type and asphalt mixture composition on low-temperature strength properties according to various test methods. *Materials*, 11, 11, 2118.
- Racz, Z. S., Vas, L. M., 2005. Relationship between the flexural properties and specimen aspect ratio in unidirectional composites, *Composite Interfaces*, 12, 3-4, 325-339.
- Radhakrishnan, V., Chowdari, G. S., Reddy, K. S., Chattaraj, R., 2019. Evaluation of wheel tracking and field rutting susceptibility of dense bituminous mixes, *Road Materials and Pavement Design*, 20, 1, 90-109.
- Şengöz, B., Açar, E., 2005. Asfalt film kalınlığının bitümlü karışımların yaşlanmasına etkisi, *İTÜ Dergisi/d*, 4, 1, 71-82.
- Valle, P.D., Thom, N., 2016. Reliability in pavement design, In *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Prague.
- Valle, P.D., Thom, N., 2020. Pavement layer thickness variability evaluation and effect on performance life, *International Journal of Pavement Engineering*, 21, 7, 930-938.
- Wagoner, M. P., Buttlar, W. G., Paulino, G. H., Blankenship, P., 2005. Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a disk-shaped compact tension test. *Transportation Research Record*, 1929, 1, 183-192.
- Walubita, L. F., Fuentes, L., Prakoso, A., Pianeta, L. M. R., Komba, J. J., Naik, B., 2020. Correlating the HWTT laboratory test data to field rutting performance of in-service highway sections, *Construction and Building Materials*, 236, 117552.
- Xu, W., Wei, X., Wei, J., Chen, Z., 2020. Experimental evaluation of the influence of aggregate strength on the flexural cracking behavior of epoxy asphalt mixtures, *Materials*, 13, 8, 1876.
- Yıldırım, Y., Jayawickrama, P.W., Hossain, M.S., Alhabshi, A., Yıldırım, C., Smit, A.F., Little, D., 2007. Hamburg wheel tracking database analysis. Report No. FHWA/TX-05/0-1707-7. Texas Department of Transportation, Austin, Texas.
- Yıldırım, Y., Kennedy, T.W., 2001. Correlation of field performance to Hamburg wheel tracking device results, No. FHWA/TX-04/0-4185-1, Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, University of Texas at Austin.
- Yin, A., Yang, X., Zeng, G., Gao, H., 2014. Fracture simulation of pre-cracked heterogeneous asphalt mixture beam with movable three-point bending load, *Construction and Building Materials*, 65, 232-242.
- Zhang, W., 2015. Evaluation of Field Transverse Cracking of Asphalt Pavements. Doctoral Dissertation, Washington State University.
- Zhou, F., Chen, D. H., Scullion, T., Bilyeu, J., 2003. Case study: Evaluation of laboratory test methods to characterize permanent deformation properties of asphalt mixes, *International Journal of Pavement Engineering*, 4, 3, 155-164.
- Zhu, Y., Ni, F., Li, H., 2017. Calibration and sensitivity analysis of rut prediction model for semi-rigid pavement using AASHTOWare ME design, *Road Materials and Pavement Design*, 18, 23-32.



CAST APPLICATION: A CASE STUDY OF CAPECO MULTIPLE TANK EXPLOSION

Müge Ensari ÖZAY*

Uskudar University, Faculty of Health Sciences, Department of Occupational Health and Safety, Istanbul, Turkey

Keywords

*Accident Analysis,
Explosion,
Safety Management,
Occupational Safety,
Major Industrial Accident.*

Abstract

Although major industrial accidents caused by hazardous chemicals such as petroleum products are rare in the chemical and petroleum processing industries, they cause significant financial losses, deaths and serious environmental impacts. Even though traditional accident investigation methods work well for linear systems, an accident analysis method built on systems theory helps to analyze major industrial accidents. This study analyzes the Caribbean petroleum tank terminal explosion using Causal Analysis based on Systems Theory (CAST) method. The main purpose of this research is to examine the causes of the accident with a risk assessment based on systems theory apart from traditional methods. The Caribbean petroleum tank terminal explosion was chosen for the study because it was one of the largest tank accidents in the last 50 years. In order to prevent future accidents, it is of great importance to analyze past accidents by analyzing them with new methods. For this purpose, various data and documents related to CAPECO accidents were examined in detail within the framework of CAST methodology. The CAST analysis revealed direct and indirect causal factors related to the CAPECO accident. The lack of management standardization and operational systems were the leading direct causes for the accident. Other main reasons were identified as the absence of an independent automatic overfill prevention system, a lack of considerations on the worst-case scenario, unreliable critical equipment, and inability to detect a large overflowing vapor cloud spreading into the terminal area. The study indicates that CAST methodology can reveal many causal factors at different hierarchical levels of a system.

CAST UYGULAMASI: CAPECO ÇOKLU TANK PATLAMASI ÖRNEK ÇALIŞMA

Anahtar Kelimeler

*Kaza Analizi,
Patlama,
Güvenlik Yönetimi,
İş Güvenliği,
Büyük Endüstriyel Kaza.*

Öz

Petrol ürünleri gibi tehlikeli kimyasalların neden olduğu büyük endüstriyel kazalar kimya ve petrol işleme endüstrilerinde nadir görülmesine rağmen, önemli mali kayıplara, ölümlere ve ciddi çevresel etkilere neden olmaktadır. Geleneksel kaza inceleme yöntemleri doğrusal sistemler için iyi çalışsa da, sistemler teorisine dayanan bir kaza analiz yöntemi, büyük endüstriyel kazaların analiz edilmesinde daha etkili olmaktadır. Bu çalışma, Karayip petrol tankı terminal patlamasını sistemler teorisi yöntemine dayalı nedensel analiz (CAST) yöntemini kullanarak analiz etmektedir. Bu araştırmanın asıl amacı, kazanın nedenlerini geleneksel yöntemlerin dışında sistem teorisine dayanan bir risk değerlendirmesi ile incelemektir. Karayip petrol tankı terminal patlaması kazasının araştırma için seçilme nedeni, son 50 yıl içinde gerçekleşen en büyük tank kazalarından biri olmasıdır. Gelecekte olabilecek kazaları önlemek için geçmişte yaşanan kazaları nedenleri ile yeni metodlar ile analiz ederek incelemek büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, CAPECO kazası ile ilgili çeşitli veri ve belgeler CAST metodolojisi çerçevesinde detaylı incelenmiştir. CAST analizi sırasında CAPECO kazasıyla ilgili doğrudan ve dolaylı nedensel faktörler ortaya çıkarılmıştır. Yönetim standardizasyonu ve operasyonel sistemlerin eksikliği, kazanın önde gelen doğrudan nedenleri olarak belirlenmiştir. Diğer ana nedenler, bağımsız bir otomatik taşma önleme sisteminin olmaması, en kötü durum senaryosunun dikkate alınmaması, güvenilirlik kritik ekipman ve taşarak terminal alanına yayılan büyük

* İlgili yazar / Corresponding author: mugeensariozay@gmail.com

bir buhar bulutunun tespit edilememesi olarak belirlendi. Çalışma, CAST metodolojisinin bir sistemin farklı hiyerarşik seviyelerinde birçok nedensel faktörü ortaya çıkarabileceğini göstermektedir.

Alıntı / Cite

Ozay, M.E., (2022), Cast Application: A Case Study of Capeco Multiple Tank Explosion, Journal of Engineering Sciences and Design, 10(1), 74-83

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M.E. Özay, 0000-0002-4785-5503

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	11.05.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	19.09.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	16.11.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Introduction

Industrial accidents caused by hazardous chemicals such as petroleum products pose a significant threat to human well-being and the environment (Casal, 2018; Jung, Woo, and Kang, 2020). Although major accidents in the chemical and petroleum processing industries are rare, they might result in substantial financial loss, fatalities and the severe environmental impacts (Jung, Woo, and Kang, 2020; Hou, et. al, 2021). For this reason, industries take precautions to prevent accidents and regulators enforce them to comply with regulatory rules (Ni, et. al, 2020). Nevertheless, several tank explosion accidents occurred in the past 30 years (Atkinson, et. al, 2017; Zhang, et. al, 2019; Jung, Woo, and Kang, 2020; Hou, et. al, 2021) resulting in deaths and injuries as well as significant damages to surroundings and environment (Marsh Report, 2018).

The concept of accident investigation has been proposed in enterprises to ensure lessons are learnt and eliminate the reoccurrence of similar accidents and reduce process-based risk (Accou and Reniers, 2019). Accident investigations help to explain the causes of an accident by using accident analysis techniques (Saleh, et. al, 2010). However, the traditional methods like event tree analysis, fault tree analysis, failure modes and effects analysis, etc. (Underwood and Waterson, 2013; Kim, Nazir and Øvergård, 2016; Gür, et. al, 2021) in accident analysis are not satisfactory to analyze the system elements' interactions. In addition to the traditional systems, there are several system approach based accident analysis models (Underwood and Waterson, 2013) like Functional Resonance Analysis Method (Hollnagel, 2014; Kaya, et. al, 2019), AcciMap (Rasmussen, 1997).

CAST provides a new causality model to analyze accidents in complex socio-technical systems (Leveson, 2012). As Leveson (2011) explained, the main purpose of accident analysis is not to find someone to blame, but to maximize what can be learned from the accident. The ultimate goal of CAST accident analysis is to learn how to avoid losses in the future. CAST aims to learn as much as possible from each accident.

In this study, Leveson's CAST model is preferred to analyze the CAPECO multiple tank explosion, since CAST assists to understand the entire accident process and further promotes generating complete recommendations for improving the overall system safety while encompasses a broader view both in engineering and operational aspect of the system. Thus, this study aims to demonstrate a CAST-based accident analysis of a catastrophic vapor cloud explosion at the Caribbean Petroleum Corporation (CAPECO) facility.

2. Literature Survey

Understanding socio-technical system accidents by systems thinking approach has a significant approach in terms of accident analysis research (Salmon et al., 2012; Stanton et al., 2012). It is necessary to examine the accidents as the result of unexpected, uncontrolled relationships between the parts that make up a system and to analyze the systems as a whole. Traditional cause-effect accident models suggest that complex system accidents are caused by equipment failures or unsafe human action (Underwood and Waterson, 2013). However, as system complexity increases, accidents occur as complex phenomena within the normal operational variability of a system (Carvalho, 2011). Therefore, as a new approach, systems thinking approach and risk assessment and accident analysis methods have been developed. Systems-Theoretic Accident Model and Processes (STAMP) is one of these methods and CAST model is derived from STAMP. STPA analysis can identify all potential scenarios that could lead to losses, and these scenarios can then be used to prevent accidents (Altabbakh, et al., 2014). CAST helps to determine the accident scenario that occurred. CAST analysis of past accidents can be used to prevent further losses (Leveson, 2019).

STAMP have been applied to water contamination accident (Leveson et al., 2003), aerospace systems (Leveson, 2004), U.S. biodefense (Laracy, 2006), aircraft accidents (Nelson, 2008), railway transportation (Ouyang et al., 2010; Underwood and Waterson, 2014), and aviation (Mogles, Padget and 2018).

CAST have been applied to various fields like Korean Sewol ferry accident (Kim, Nazir and Øvergård, 2016), Soma mine disaster in Turkey (Düzgün and Leveson, 2018) and pipeline gas explosion in Taiwan (Li, et. al, 2020) by accounting human errors, constraints, organizational factors and hierarchical control levels (Leveson, 2011).

Kim and coworkers (2016) analyzed the tragic Korean Sewol ferry Ro-Ro cruise ship accident with CAST, examining the weaknesses in the security control structure from a systemic perspective. With the STAMP-based CAST accident analysis model, he analyzed the systemic problems of the Sewol accident from a broad perspective, revealing the rationale behind the decisions that led to a large number of deaths.

Düzgün and Leveson (2018) analyzed the Soma Mine accident that occurred in 2014 due to the fire in the underground coal mine and caused the death of 301 people with CAST. Considering the complex structure of the mine and the accident, the researchers had been determined that socio-technical factors such as unstructured organization and human performance in the accident and inadequate safety culture, wrong decision making and risk perception play important role in the occurrence of the accident. In addition, inadequate system control constraints are identified at each hierarchical level of the system and suggested improvements accordingly.

Li and colleagues (2020) studied the devastating underground pipeline gas explosion in Taiwan, one of the biggest oil disasters in Chinese history, with CAST analysis. They analyzed the system hazards hierarchically and the results revealed that it systematically violated inadequate control and security restrictions.

The CAST technique has been applied in this study as it will provide an in-depth understanding of how dynamic, complex system behavior contributes to accidents. It should be stated that the case study of CAPECO multiple tank accident will supportive to show that CAST analysis is suitable for situations with a high degree of uncertainty regarding accident occurrence. The accident investigation presented in this study can also be used to prevent such major industrial accidents at different levels of the accident control hierarchy.

3. Material and Method

The aim of this study is to investigate the causes of the Caribbean petroleum tank terminal explosion accident with a risk assessment based on systems theory apart from traditional methods. Analysis of the CAPECO multiple tank explosion accident with the framework of CAST methodology will have a contribution to the literature in understanding the systems thinking approach for accident analysis. In addition to that it could be a case study to prevent future accidents in petroleum industry. Therefore, various data and documents related to CAPECO accidents were examined in detail with CAST methodology.

3.1. CAPECO facility

The CAPECO was established in 1955 as a refinery. It had started to serve as a petroleum products storage facility since 2003 (CSB, 2010). The primary operations performed at the facility were product loading and unloading. The storage capacity of the facility is 341,000 cubic meters (Doğan, Scarabella and Akman, 2020). The CAPECO facility consists of 4 main sections: an administration area, a decommissioned refinery, a tank farm, and a wastewater treatment plant. In addition, the facility had a loading dock on San Juan Bay in Puerto Rico. The most basic operation performed at the facility was product loading and unloading. The unloading times are scheduled for ships arriving in port, and CAPECO pays the penalty in case of a delay in this process. The levels of the tanks were recorded by operators every morning. Only one of the tanks (Tank 107) could receive the total amount of gasoline on a ship. For this reason, sometimes discharging was done by sharing between several tanks. Due to the storage constraints and tonnage differences for incoming vessels, operators' calculations and communication were vital between operators.

At the day of the accident, five million gallons of gasoline overflowed from the aboveground storage tank and formed a vast vapor cloud to an ignition source near the plant's wastewater treatment plant (CSB, 2010). As a result of the explosions, 17 of the 48 oil storage tanks were damaged by the fire that lasted three days (CSB, 2010). Sixty-five people were working in the facility during the incident, but no fatalities happened.

3.2. CAST

CAST derived from STAMP, is a recently developed method to analyze accident causality. The CAST involves five parts as shown in Table 1: (1) assembling basic information, (2) modelling safety control structure, (3) analyzing each component in loss, (4) identifying control structure flaws and (5) an improvement program (Leveson, 2019).

Table 1. Basic components of CAST

Components of CAST	Explanation
1. Assemble Basic Information	Accident, Hazards, Constraints, Events, Physical Loss, Questions
2. Model Safety Control Structur	Model the existing safety control structure for this type of hazard. Controls and controllers and their role in the accident
3. Analyze Each Component in Loss	Contributions to Accident, Mental Model Flaws, Context, Questions
4. Identify Control Structure Flaws	Communication, Coordination, Safety Info System, Culture, Changes & Dynamics, Economics, Environmental, Questions
5. Create Improvement Program	Recommendations, Implementation, Feedback, Follow-up

In the first part, the basic information is collected to perform the analysis. The accident is described without conclusions nor blame. Questions are generated to explain why the incident occurred. The loss and hazardous state are described. Failures and unsafe interactions leading to the hazard, missing or inadequate physical controls are analyzed. In the second part, the safety control structure for the incident is modelled. In the third part, the control structure components are examined to determine why loss prevention is not sufficient. In the fourth part, flaws in the control structure are identified as general systemic factors. In the fifth part, recommendations are provided to prevent a similar loss in the future.

In this study, the authors reviewed Caribbean Petroleum Tank Terminal Explosion and Multiple Tank Fires, Investigation Report (CSB, 2010) and ÇASGEM (Doğan, Scarabella and Akman, 2020) reports analyzing tank explosion accidents CAPECO facility by using CAST.

4. Case Study

4.1. Part 1: Basic information

On Wednesday, October 21, 2009, the cargo ship approached the port in Bayamon, Puerto Rico to deliver products. CAPECO assigned 7 people, 4 of whom were its personnel, for the evacuation process of the 43,600 m³ of gasoline. There was only one tank (tank number 107) to receive this amount of product, and that tank already contained product. The authorities then decided to distribute the product to the interconnected small tanks numbered 405, 504, 409 and 411, and to send the remaining amount to tank 107 (Doğan, Scarabella and Akman, 2020).



Figure 1. Photos of the accident site (Doğan, Scarabella and Akman, 2020).

A catastrophic explosion happened at the CAPECO facility in Bayamón, Puerto Rico, on October 23, 2009 (see Figure 1). The explosion registered 2.9 on the Richter scale, occurred during the transfer of gasoline from a ship to the tank onshore (CSB, 2010). The explosion happened after the gas created a large vapor cloud, reached an ignition source near the plant's wastewater treatment plant. Five million gallons of gasoline overflowed from the aboveground storage tank in the incident. In addition to 530 fire-fighters, 900 security guards fought intensely for 66 hours to prevent the fire spreading to other tanks. 17 of the 48 petroleum storage tanks were damaged due to the explosion and fire (CSB, 2010). The shock pressure wave of the explosion damaged nearly 300 building around the terminal. The military facility located near CAPECO had damages over \$5 million (Doğan, Scarabella and Akman, 2020). Thousands of gallons of petroleum products and fire suppression foam caused environmental pollution. After reviewing several reports, the authors identified the system hazards related to the accident: gasoline vapor cloud explosion and the exposure of employees, the public, the nearby military facility, and the ecosystem to toxic chemicals. Accordingly, safety constraints were identified as follows:

System hazard 1: Gasoline vapor cloud explosion

Safety constraints:

1. Petroleum products must be under control at all times (i.e., overflow to the environment must be prevented).
2. An independent high-level alarm system must be equipped.
3. Calculations and procedures must be standardized.

Table 2 shows the proximal events leading to the gasoline vapor cloud explosion at CAPECO facility.

Table 2. The timeline of the events in the accident (CSB, 2010)

Date	Time	Event
10/22/09	01:40	Bulk pumping began into 504, 409 and 411.
10/22/09	12:15	The employee noticed that the tank level indicator was stuck while the gasoline was transferred to tank number 504. He climbed to the top of tank 504 to visually inspect the level and found that it was below the fill level. The operator and supervisor decided to close Tank 504 early and to open the valve of the tank number 409. Thus, 26,500 liters of gasoline started to flow into the 409 tank per minute. The same employee also opened the tank 411 a little and provided a small amount of gasoline flow to the tank 411.
10/22/09	22:10	The tank operators determined that Tank 411 is full and closed tank 411 and fully opened tank 409. The tank operator estimated that 409 would be full around 1 a.m.
10/22/09	23:25-24:00	Tank 409 began to overflow. The CSB calculated that the overflow lasted approximately 26 minutes.
10/23/09	24:00	The tank operator noticed fog on the ground and the road along with tanks 504, 411, and 409, and warned the supervisor. The supervisor and the operator attempted to drive around to the other side of the fog to determine the origin of the fog.
10/23/09	00:23	Security cameras recorded an ignition in the vapor cloud at the wastewater disposal facility. Explosion occurred.

The Chemical Safety Board (CSB) team arrived at the accident area two days after the explosion. The team worked with the Puerto Rico Occupational Safety and Health Administration (PR OSHA) and the US Environmental Protection Agency (EPA). The CSB found that CAPECO had insufficient regulatory requirements in case of hazard assessment and did not take proper precautions to prevent accident. The CSB noticed that the local fire department was not ready for proper response to multiple tank fires. CSB also found deficiencies in various OSHA standards and EPA policies to protect workers and the public.

4.2. Part 2: Modelling safety control structure

Safety in CAST is considered as a control problem, and thus, a safety control structure is modelled during the analysis. The authors first modelled a very high-level control structure and, then, created a detailed one. Figure 2 shows the detailed safety control structure for the accident.

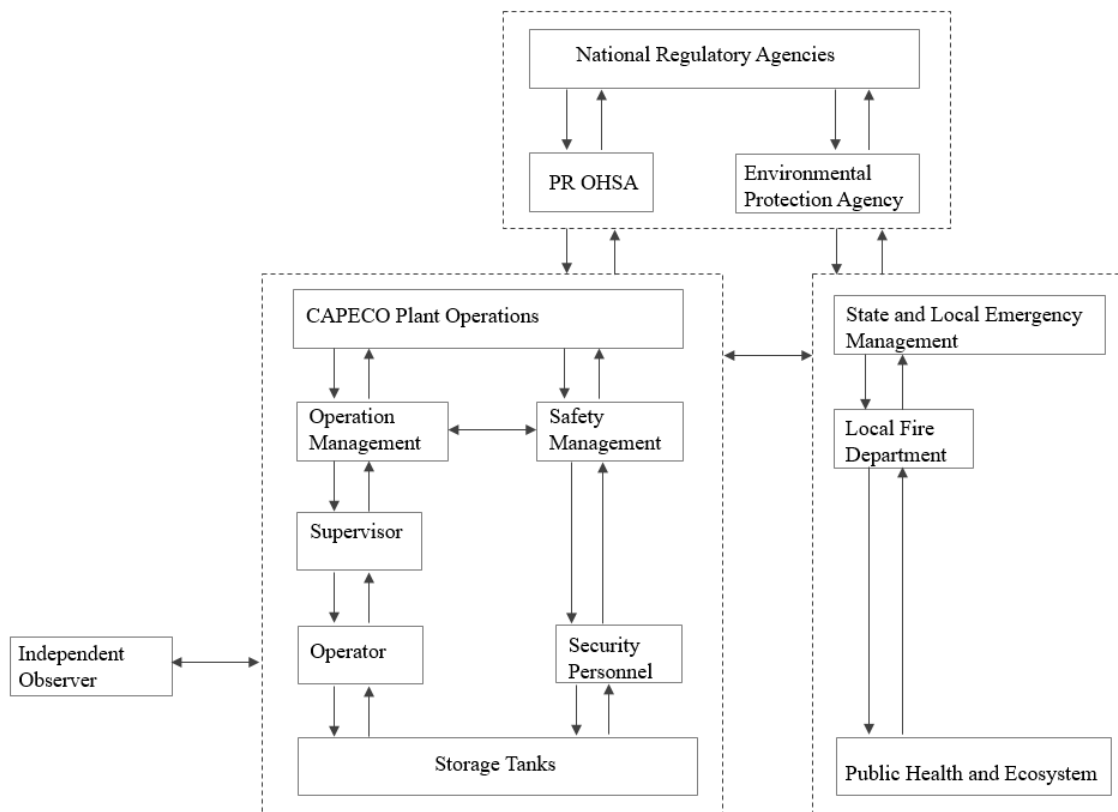


Figure 2. Safety control structure

4.2. Part 3: Analyze each component in loss

In this part, the authors analyzed each component in loss by identifying responsibilities, process model flaws and recommendations. Figure 3 shows the CAST analysis for CAPECO. In 2004, CAPECO installed transmitter cards on the float and level measuring strip that transmitted the liquid level to the computer in the operator's offices and the planning department. The computer instantly determined the liquid depth, the total volume depending on the level measuring strip, and the time-dependent flow velocities into or out of the tank and calculated the fill rate. However, during the accident day, since the computer system was not working and no data was received, the shift supervisor and the tank farm operator calculated the filling time with the data received from the planning department. Due to the frequent breakdowns of indicator devices, manual level checks and related calculations were common in CAPECO. On the evening of the incident, the level gauges of tank number 409 were not sending data to the computer. Noticing that the tank level indicator remained stuck while the gasoline was transferred to the second tank, tank number 504, the employee completely opened the corresponding tank number 409. When it was predicted that the tank number 409 would be completely filled during the shift change, the valve of the tank number 409 was almost completely closed, and the valves of the tank number 411 were opened entirely in order to avoid any overflow problems during the shift change. However, tank number 409 started to overflow and form a cloud of vapor around 24:00 before the calculated time. A fog layer formed around the tank and other tanks (Tanks 504 and 411). At 24.00 o'clock, the employee noticed a steam cloud and a sharp gasoline smell before coming near the tank. The personnel could not identify the source of the gas flowing out due to the inadequate lighting at night and the topography of the facility. The lack of sufficient lighting in the area, the use of manual lanterns prevented operators from observing whether the valves were open or closed on the night of the event. CSB detected that the safety pool drain valve for Tank 409 at the time of the incident was open when it should have been closed (CSB, 2010).

CAPECO

Inadequate Control Actions:

- The amount of transferred petroleum product: Only one tank can receive this amount of substance
- Level gauges of the tanks and feedback computer system not working
- The computer system and the transmitter card are not reliable
- Lack of Automatic flow restrictor or flow shut-off
- Low number of staff
- Lack of sufficient camera system in the facility
- Hourly tank level reading by the operator
- Lack of formal evacuation procedures
- Lack of preventive maintenance
- Lack of high-level alarm systems
- Poor management of terminal operations
- Organizational problems
- The internal pressure of the planning department to the operation department
- Lack of reliability of critical equipment
- Lack of reliable machine maintenance
- Lack of procedures, standards for safe working conditions
- The lack of sufficient lighting in the area

Mental Model Flaws:

- Inadequate risk management to prevent the accident.
- Inadequate experience and competence in risk assessment and emergency response plans.
- Inadequate emergency response

Figure 3. CAST analysis for CAPECO

The planning department's internal pressure to the operation department to obtain material income by completing the transfers in a shorter time than the anticipated in the loading/unloading operations created a risky rush in the activities. In addition, attempting to use the tanks at full capacity to obtain the maximum benefit from the tanks has become a practice by the planning department. For this reason, tanks were usually filled to the last level.

Since there is a lack of personnel and increased manual work problem in the operation department, operators generally leave the valves of the next tank open. On the day of the incident, when the operator had to change the line to fill another tank, the unit became uncontrolled due to having to call the wastewater disposal unit operator for assistance.

The operators were working with unreliable "critical equipment". It was determined that CAPECO had purchased a system with the lowest efficiency for the measurement and did not implement an adequate preventive maintenance program for its maintenance. The deficiencies in critical equipment in the level control and

monitoring system (transmitters in the side indicator, float and tape level measurement system in the tank) prevented operators from determining tank levels during filling operations.

The lack of an independent warning alarm and/or an automatic flow shut-off system poses a significant risk. The security system is highly dependent on human factors, and the automation is not at the desired level is a critical security deficiency. Operators had been calculating tank levels manually for years before the accident. Therefore, instant data tracking was not possible in the control room. Manual execution of the works with personnel calculations as a result of the indifference and normalization of the administration against the improper operation of the level measurement devices increased the risk factor.

CAPECO's standard operating procedures only address activities that require a work permit and do not cover terminal operations. In 2009, guidelines on activities subject to permission, such as working with only resources and indoor work were prepared. A guide has not been established on the procedure to be followed during loading and unloading operations. There were two-page activity rules, last updated in 1999. The operation was entirely left to the experience and initiative of the operators.

Figure 4 shows the CAST analysis for the local fire department and state and local emergency management. The local fire department was not adequately equipped. This was because risk analysis was not conducted to consider and plan multiple tank fires leading to vapor cloud explosion. On the day of the incident, neither CAPECO nor the regional fire brigade has the capability to deal with a multi-tank fire of this size. To control a fire of this size, large amounts of foam had to be delivered to the top of the tanks, but there was not enough pressurization. CAPECO staff and local fire-fighters, on the other hand, were not trained for 11 tank fires caused by the vapor cloud explosion. According to an emergency plan, the worst-case scenario was explained by the burning of a single tank. Local fire brigades did not have enough training and resources to respond to fires and explosions in industry.

Local Fire Department

Inadequate Control Actions:

- Insufficient equipment for multiple tank explosion.
- Insufficient pressure to spray foam into the tank height
- Inadequate training for 11 tank fires caused by the vapor cloud explosion
- Lack of authority and coordination in multiple emergency response

Mental Model Flaws:

- Lack of experience, training and equipment to handle such a big scale major accident

State and Local Emergency Management

Inadequate Control Actions:

- Insufficient training and documentation.

Mental Model Flaws:

- Inadequate performance in hazard assessment that the facility posed a high hazard

Figure 4. CAST analysis for the local fire department and state and local emergency management

Figure 5 shows the CAST analysis for the government and regulatory agencies. According to the EPA and OSHA's legislation of that day, storage facilities like CAPECO were not seen as high-risk facilities; there was no need for comprehensive risk analysis. Although the EPA identifies facilities such as CAPECO as major damage facilities, the risk assessment required for these facilities under the Plant Response Plan requirements does not consider the probability of multiple tank releases as a worst-case scenario. At the time of the accident, there were deficiencies in legal scope under the Occupational Health and Safety Administration (OSHA) Process Safety Management (PSM) standard and the Environmental Protection Agency (EPA) Risk Management Plan (RMP). Tank terminal facilities were not required to carry out a risk assessment to manage flammable hazards on-site or to follow Recognized and Generally Accepted Good Engineering Practices (RAGAGEP).

The lack of coordination between the 43 federal, national and non-governmental organizations that responded to the CAPECO incident further complicated the emergency response. The multitude of organizations that intervened in the incident and the lack of coordination between them made it impossible to manage the emergency authorization systems.

The public living near CAPECO was evacuated. As there were no planned evacuation routes or shelters, inhabitants gathered in the streets. Thousands of gallons of oil and firefighting foams spilt into Malaria Creek, the water was polluted. As a result of the environmental assessment conducted by the EPA, the US Fish and Wildlife Service (USFWS) and the Puerto Rico Ministry of Natural Resources (PR DNR), it was determined that many creatures, including several legally protected species, died by being covered in oil.

National Regulatory Agencies**Inadequate Control Actions:**

- Insufficient documentation and regulations

Mental Model Flaws:

- Lack of regulation in major industrial accidents.

Puerto Rico Occupation Safety Health and Administration (PR OSHA)**Inadequate Control Actions:**

- Inadequate legislation of that day: petroleum product storage facilities were not seen as high-risk facilities.
- Inadequate legislation of that day: no need for comprehensive risk analysis.
- Inadequate legislation of that day: local fire department were not adequately equipped

Mental Model Flaws:

- Regulatory deficiencies
- Risk assessment deficiencies in multi-tank explosions

Environmental Protection Agency**Inadequate Control Actions:**

- Lack of documentation to recognize multiple tank releases as a worst-case scenario
- Lack of a risk assessment to manage flammable hazards on site.

Mental Model Flaws:

- Regulatory deficiencies

Figure 5. CAST analysis for the government and regulatory agencies

4.4. Part 4: Identify Control Structure Flaws

In addition to the process model flaws, the authors identified systemic factors that affect system components and their interactions. These factors include communication and coordination as well as safety and organizational culture. Communication was crucial during the operations in the evacuation process. Since the operators required constant contact during manual loading process, they communicated via radio transceivers. Coordination was essential between tank operators and shift supervisors to ensure all necessary valve alignments and efficient switching arrangements between tanks. Communication and coordination between the planning department and the operation department were significant for carrying out the loading/unloading operations quickly. Overall health and safety can be compromised for fast discharge. Thus, the flaws in communication augmented the risk factor in the accident. Inadequate safety and organizational culture resulting in management's perception of a low-risk business despite poor design and operating conditions. Besides technical and engineering issues, safety culture and operational discipline are general overarching factors that affect the safety performance of a facility. Behavioral safety and safety culture are vital to the safe operation of the facility and accident prevention.

4.5. Part 5: Improvement program suggested improvements for the safety control structure

As a result of the CAST-based analysis of CAPECO accident applied in this study, direct and indirect causal factors related to the accident were determined. The direct cause that contributed to this accident was the lack of standardization of management and operational systems. Other major causes include:

- (1) Absence of an independent "Automatic Overfill Prevention System"
- (2) Insufficient documentation to recognize multiple tank releases as a worst-case scenario
- (3) Insufficient reliability of critical equipment
- (4) Flaws to detect a large amount of overflowed vapor cloud spread through the terminal area.

As a result, suggested improvements for the safety control structure are constructed in Figure 6. Instead of just trying to correct visible human errors, the control defects identified by the CAST analysis of this study produces the following safety recommendations to prevent such accidents in the future.

CAPECO**Overall System**

- Perform proper risk analysis to recognize potential hazards and consequences and to take necessary precautions
- Revise and design the filling plan, ventilation, conveyance, communication systems before starting the transfer so that all system components support the transfer safely
- Install ex-proof/ATEX certified material in all part of the system
- Track gasoline loading with up-to-date electronic systems
- Establish a detailed database to monitor any activity at the facility
- Provide efficient and satisfactory level gauges of the tanks to detect the fuel discharge flow rate to the terminal
- Take necessary precautions when the “Automatic Overfill Prevention System” give alert and search for the potential causes
- Keep updated and systematic records of automatic prevention system measurements
- Installing motorized valves would eliminate the need to open large valves manually

Operators

- Give adequate training to all workers about the safety issues and monitor the impact of education
- Track operators according to their location in the facility
- Practice exercises for fire and evacuation
- Give special training to the control room operators in terms of coordination and communication for emergencies

Management

- Establish procedures to report unsafe activities
- Develop standards for safe working conditions
- Establish a safety culture among all employees
- Develop emergency management plans and implement evacuation and train all the operational and managerial staff
- Assemble a trained and experienced team for emergencies and provide specialized training and equipment to them

Figure 6. Suggested improvements for the safety control structure

5. Conclusion

Several lessons have been learnt as a result of this major industrial accidents. This accident demonstrated the need to adopt systems approach to identifying safety constraints. In this study, the accident was analyzed with CAST analysis based on CSB incident reports. Alternatively, a systems approach using CAST would not only look at what the operators did that contributed to the accident but, more important, why they did it. Since level gauges of the tanks and feedback computer system did not working, and there isn't an independent automatic overfill prevention system, the operators had been calculating tank levels manually. Sometimes, official results miss much of the information that could be useful in preventing such accidents in the future. Some of the many contributors to this accident were the design of the automation, the lack of an independent warning alarm and/or an automatic flow shut-off system.

In-tank terminals, where petroleum products are stored in a safety management system, and safe working procedures should be set out clearly and in detail. Insufficient safe working procedures budget cuts in training, maintenance, and equipment replacement often result in an accident. In addition, the control of the measures and the planning and coordination in the emergency response organization should be done properly. As a result, administrative personnel, maintenance personnel, and operation personnel should pay attention to safe working processes in risky activities to prevent similar accidents.

The most important point to be considered in order to carry out the CAST analysis successfully is modeling the existing safety control structure for this type of hazard. Leveson (2019) stated that *“The model of causality underlying CAST treats safety as a control problem, not a failure problem. The cause is always that the control structure and controls constructed to prevent the hazard were not effective in preventing the hazard. The goal is to determine why and how they might be improved.”* Similar accidents have occurred in the sector and control measurements were taken. The main purpose of this analysis is to determine why control measures are not effective and how they can be improved. Some of the controls may be general security applications, while others may be specific controls designed for certain situations. As the analysis progresses, the original hazards on the facility can be identified by performing a hazard analysis that goes beyond identifying the probabilities of failure with the questions generated.

Although the evaluation of each accident analysis is based on different reasons in itself, the results of this study and those of Li and coworkers (2020), who adopted the CAST analysis of the catastrophic underground pipeline gas explosion in Taiwan, have similarities in results according to the following respects: CAST enables the analysis of complex sociotechnical accidents, establishing the safety control structure and then updating it according to changes over time facilitates the investigation of accident causes.

CAST systematically revealed safety flaws. In the traditional accident causality analysis, someone or something is often blamed, and the analyst aims to identify a root cause. CAST, however, treats safety as a control problem. The

results demonstrate that CAST allows analyzing the complex socio-technical accidents like multiple petroleum product tank terminal accident.

Acknowledgement

I would like to give my special thanks to Assist. Prof. Dr. Gülsüm Kübra Kaya from Istanbul Medeniyet University for her valuable contributions to the study.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

References

- Accou, B., Reniers, G., 2019. Developing a method to improve safety management systems based on accident investigations: The SAFETY FRactal Analysis. *Safety Science*, 115, 285–293.
- Altabbakh, H., AlKazimi, M.A., Murray, S., Grantham, K., 2014. STAMP - Holistic system safety approach or just another risk model?. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 32, 109–119,
- Atkinson, G., Cowpe, E., Halliday, J., Painter, D. 2017. A review of very large vapour cloud explosions: Cloud formation and explosion severity. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 48, 367–375.
- Carvalho, P.V.R., 2011. The use of functional resonance analysis method (FRAM) in a mid-air collision to understand some characteristics of the air traffic management system resilience. *Reliability Engineering & System Safety* 96 (11), 1482–1498.
- Casal, J., 2018. Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. Cambridge, MA: Elsevier.
- CSB. 2010. Caribbean Petroleum Tank Terminal Explosion and Multiple Tank Fires. Investigation Report, No. 2010.02.I.P.R, US Chemical Safety and Hazard Investigation Board, Washington, DC.
- Doğan, B., Scarabella, H.A., Akman, A., 2020. Proses Güvenliği Kazalardan Çıkarılan Dersler. ÇASGEM, Ankara, Turkey.
- Düzgün H. S., Leveson, N., 2018. Analysis of soma mine disaster using causal analysis based on systems theory (CAST). *Safety Science*, 110, 37–57.
- Gür, B., Yavuz, S., Çakır, A. D., Köse, D. A., 2021. Determination of Hazards and Risks in a Solar Power Plant Using the Matrix Risk Analysis. *European Journal of Science and Technology*, 23, 497–511.
- Hollanagel, E., Hounsgaard, J., Colligan, L. 2014. The functional resonance analysis method - a handbook for the practical use of the method.
- Hou, J., Gai, W., Cheng, W., Deng, Y., 2021. Hazardous chemical leakage accidents and emergency evacuation response from 2009 to 2018 in China: A review. *Safety Science*, 135, 105101,
- Jung, S., Woo, J., Kang, C., 2020. Analysis of severe industrial accidents caused by hazardous chemicals in South Korea from January 2008 to June 2018. *Safety Science*, 124, 104580.
- Kaya, G., Ovalı, H., Öztürk, F., 2019. Using the functional resonance analysis method on the drug administration process to assess performance variability. *Safety Science*, 118, 835–840.
- Kim, T.E., Nazir, S., Øvergård, K. I., 2016. A STAMP-based causal analysis of the Korean Sewol ferry accident. *Safety Science*, 83, 93–101.
- Laracy, J.R., 2006. A systems theoretic accident model applied to biodefense. *Defence and Security Analysis*, 22(3), 301–310.
- Leveson, N.G., 2011. Applying systems thinking to analyze and learn from events. *Safety Science*, 49 (1), 55–64.
- Leveson, N.G., 2012. *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*. The MIT Press, Cambridge, England.
- Leveson, N.G., 2019. *CAST HANDBOOK : How to Learn More from Incidents and Accidents*.
- Li, F., Wang, W., Xu, J., Dubljevic, S., Khan, F., Yi, J., 2020. A CAST-based causal analysis of the catastrophic underground pipeline gas explosion in Taiwan. *Engineering Failure Analysis*, 108, 104343.
- Marsh Report. 2018. *The 100 Largest Losses 1978-2017 Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon Industry*. 25th Edition, Marsh Ltd.
- Mogles, N., Padget, J., Bosse, T., 2018. Systemic approaches to incident analysis in aviation: Comparison of STAMP, agent-based modelling and institutions. *Safety Science*, 108, 59–71.
- Ni, Y., Sattari, F., Lefsrud, L., Tufail, M., 2020. A rising tide raises all boats: Regional promotion of process safety through joint government/industry management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 68, 104331.
- Ouyang, M., Hong, L., Yu, M., Fei, Q., 2010. STAMP-based analysis on the railway accident and accident spreading: Taking the China-Jiaoji railway accident for example. *Safety Science*, 48(5), 544–555.
- Rasmussen, J. 1997. Risk management in a dynamic society: A modelling problem. *Safety Science*, 27(2-3), 183–213.
- Saleh, J. H., Marais, K. B., Bakolas, E., Cowlagi, R.V., 2010. Highlights from the literature on accident causation and system safety: Review of major ideas, recent contributions, and challenges. *Reliability Engineering & System Safety*, 95, 1105–1116.
- Salmon, P.M., Cornelissen, M., Trotter, M.J., 2012. Systems-based accident analysis methods: a comparison of AcciMap, HFACS, and STAMP. *Safety Science* 50 (4), 1158–1170.
- Stanton, N.A., Rafferty, L.A., Blane, A., 2012. Human factors analysis of accidents in systems of systems. *Journal of Battlefield Technology* 15 (2), 23–30.
- Underwood P., Waterson, P., 2013. Systemic accident analysis: Examining the gap between research and practice. *Accident Analysis and Prevention*, 55, 154–164.
- Zhang, Q., Zhou, G., Hu, Y., Wang, S., Sun, B., Yin, W., Guo, F., 2019. Risk evaluation and analysis of a gas tank explosion based on a vapor cloud explosion model: A case study. *Engineering Failure Analysis*, 101, 22–35.



AZ91 MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Fevzi KELEN^{1*}, Tarık AYDOĞMUŞ², Mehmet GAVGALI³

¹ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Van, Türkiye

² Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye

³ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Magnezyum, TiNi, Hafif Alaşım ve Kompozitler, Otomotiv Malzemeleri, Korozyon.</i>	TiNi mikro partiküller ile %5-25 hacimsel oranlarda takviye edilen AZ91 magnezyum matrisli kompozit malzemelerin korozyon özellikleri %3.5 NaCl çözeltisi içerisinde potansiyodinamik polarizasyon (PDS) yöntemi ile araştırılmıştır. Elektrokimyasal değerlendirmeler Tafel ekstrapolasyonu tekniği ile saptanmıştır. Metalografik incelemeler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop (OM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal analizler elektrokimyasal değerler ile birbirini desteklemektedir. Korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) değerlerinin artan takviye miktarıyla arttığı belirlenmiştir. Korozyon sonrası yüzey incelemelerinde tüm kompozit numunelerde çukurcuk korozyonu gözlenmiştir. Matris fazda yer alan alan β -Mg ₁₇ Al ₁₂ intermetalik çökeltilerin ve yüzey morfolojisindeki homojensizliklerin kompozit malzemelerin korozyon dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

INVESTIGATION OF CORROSION CHARACTERISTICS OF AZ91 MAGNESIUM MATRIX COMPOSITE MATERIALS

Keywords	Abstract
<i>Magnesium, TiNi, Lightweight Materials, Automotive Materials, Corrosion.</i>	The corrosion features of AZ91 magnesium matrix composite materials, which are reinforced with TiNi microparticles at the rate of 5-25% volumetrically, were investigated by potentiodynamic polarization (PDS) method in 3.5% NaCl solution. Electrochemical evaluations were detected by the Tafel extrapolation technique. Metallographic examinations were carried out using a scanning electron microscope (SEM) and an optical microscope (OM). The microstructural analyses have been supporting electrochemical values. Corrosion potential (E_{cor}) and corrosion current density (i_{corr}) of values were specified to increase with increasing reinforcement amount. In post-corrosion surface examinations, pitting corrosion was observed in all composite specimens. It has been determined that β -Mg ₁₇ Al ₁₂ intermetallic precipitates in the matrix phase and inhomogeneities in the surface morphology have a significant effect on the corrosion resistance of composite materials.

Alıntı / Cite

Kelen, F., Aydoğmuş, T., Gavgalı, M., (2022). AZ91 Magnezyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Korozyon Özelliklerinin Araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 84-90.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

F. Kelen, 0000-0003-3900-4503
T. Aydoğmuş, 0000-00020928-5095
M. Gavgalı, 0000-0002-1581-2605

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	12.07.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	01.11.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	15.11.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Magnezyum ve alaşımları düşük yoğunluk, yüksek spesifik mukavemet, kolay geri kazanım ve mükemmel

* İlgili yazar/Corresponding author: fkelen@yyu.edu.tr, +90-432-225-1701

sönümleme kapasitesi gibi karakteristikleri ile otomotiv uygulamaları için en dikkat çekici yapısal malzemeler olarak ön plana çıkmaktadır. Bu malzemeler otomobillerin iç donanım, araç ön alanı, güç aktarma organları, şasi ve karoseri gibi temel sistem ve bileşenlerinde kullanılarak ağırlıkta önemli kazanımlar sağlayabilir. Böylece yakıt verimliliği iyileştirilerek hem insan sağlığı hem de çevre kalitesi açısından son derece tehlike unsurları içeren egzoz emisyonları minimize edilebilir (Gaines, et. al., 1996, Kelen, 2014., 2021a). Magnezyum alaşım serilerinden AZ91, oda sıcaklığı iyi mekanik özellikleri nedeniyle gerek otomotiv gerekse de diğer alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Otomobillerde koltuk çerçevesi, direksiyon kolunu ve braketleri, gösterge paneli ve fan gibi pek çok uygulaması bulunmasına karşın esas kullanımlarının taşıt ağırlığının önemli bir bölümünü oluşturan güç aktarma organları ve araç ön alanı bileşenleri olduğu öngörülmektedir. Fakat matris fazın düşük korozyon direnci bu uygulamalardaki kullanımlarını kısıtlamaktadır. Bu malzemelerin dezavantajlarını bertaraf etmek amacıyla partikül ya da elyaf şeklinde daha mukavemetli bir çok farkı seramik veya metalik takviye materyali kullanılmıştır. Bunların akma dayanımı, çekme mukavemeti, elastik modül, süneklik ve sürünme direnci gibi mekanik özellikler üzerindeki etkisi açıklanırken zayıf korozyon dayanımına olan tesirine pek değinilmemiştir. Özellikle magnezyum matrisli kompozit malzemelerin korozyon dayanımı hakkında yapılan çalışmalar son derece sınırlıdır (Fink, 2003, Hassan and Gupta, 2002, Nguyen and Gupta, 2010, Aydogmus, 2015, Esen, 2012, Kelen et. al., 2018, Kelen vd., 2019, 2021b, Çevik et. al. 2021). Bu çalışmada, TiNi mikro partiküller ile hacimsel olarak farklı oranlarda takviye edilen AZ91 magnezyum matrisli kompozit malzemelerin korozyon özelliklerinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

TiNi mikro partiküller ile %5, %10, %15, %20 ve %25 hacimsel oranlarda takviye edilen AZ91 magnezyum matrisli kompozit malzemeler toz metalürjisi yöntemlerinden biri olan tek eksenli sıcak presleme tekniği ile üretilmiştir. Alaşım tozlardan, matris partiküller, TangShan WeiHao Magnesium Powder Co. Ltd. (Çin), takviye materyali ise AP&C Advanced Powders and Coatings Inc. (Kanada) firmasından temin edilmiştir. Tablo 1'de kimyasal kompozisyonları geometrik şekilleri ve üretim yöntemleri verilen tozların saflığı imalatçı şirketler aracılığıyla sağlanan sertifikalı kimyasal analizler sonucu tespit edilmiştir. Alaşım tozlar bir spatula vasıtasıyla 10 dakika boyunca karıştırılmış, sonrasında 40 mm çaplı silindirik grafit kalıplarda, 420°C sıcaklıkta, 50 MPa basınçta, 1 saat süre ile inert gaz atmosferinde sinterlenmiştir. Deneylerde kullanmak amacıyla kompozit malzemelerden tüm ereyon tekniğiyle 5x5x10 mm³ boyutlarında numuneler elde edilmiştir. Elektrokimyasal analizler öncesinde tüm numuneler metalografik olarak hazırlanmış, akabinde etil alkol içerisinde 5 dakika ultrasonik temizlemeye tabi tutulmuştur. Korozyon deneyleri PCI14/750 test cihazı kullanılarak % 3.5 NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemelerin korozyon dayanımları üç elektrot yöntemine göre saptanmış, referans elektrot (RE) olarak doymuş gümüş/gümüş klorür (Ag/AgCl), karşıt elektrot (CE) olarak platin (Pt) ve çalışma elektrodu (WE) olarak da hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon (PDS) analizleri öncesi çalışma elektrodu/çözelti ara yüzeyindeki anodik ve katodik reaksiyon akımlarının denge durumuna gelmesi amacıyla potansiyelde meydana gelen değişimler ölçülmüş, akabinde eğriler, -2V ile 1V arasında katodikten anodik yöne doğru 0.5 mV/sn tarama hızında oluşturulmuştur. Elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) analizleri ise 100000 Hz'den 0.01 Hz'e kadar olan frekans aralıklarında tarama yapılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Kompozit numunelerin üretiminde kullanılan alaşım tozların özellikleri (Properties of alloy powders used in the production of composite samples)

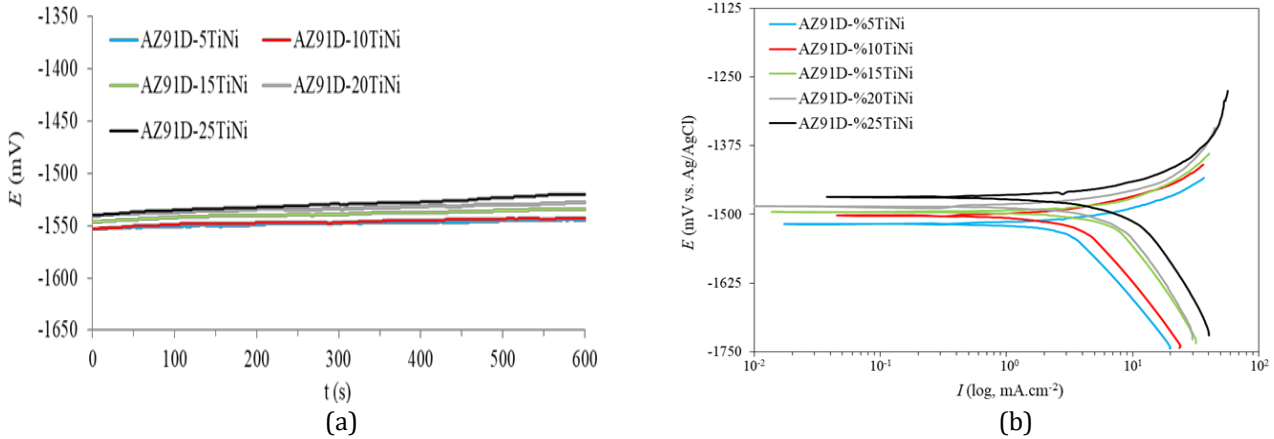
Matris ve Takviye Tozlar	Kimyasal Bileşim (%)						Toz Boyutu (µm)	Toz Şekli	İmalat Yöntemi
	Mg	Al	Zn	Ti	Ni	Diğer			
AZ91D *	90.4	8.93	0.4294			Kalan	150-300	Küresel	Atomizasyon
TiNi **			49.2	50.8			0-45		

*, % Ağırlık, **, % Atomik

3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

Tek eksenli sıcak presleme tekniği ile üretilen kompozit malzemelerin açık devre potansiyel (OCP) değişimleri ve potansiyodinamik polarizasyon (PDS) analizleri sırasıyla Şekil 1a ve b'de verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen önemli bazı korozyon parametreleri ise Tablo 2'de sunulmuştur. Numunelerin açık devre potansiyel değişimlerinin artan takviye içeriği ile artışı gözlemlenmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinde ise korozyon potansiyeli (E_{corr}) değerlerinin yanı sıra korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) değerlerinin de takviye miktarı ile birlikte arttığı belirlenmiştir. Kompozit malzemelerde korozyon hızının artması matris fazın yüksek elektronegatif potansiyeli ve yüzeyde teşekkül eden oksit/hidroksit tabakanın kararlı bir yapıya sahip olmamasından kaynaklanmaktadır. Zira yüksek elektronegatif potansiyel yapı içerisinde magnezyum oranını

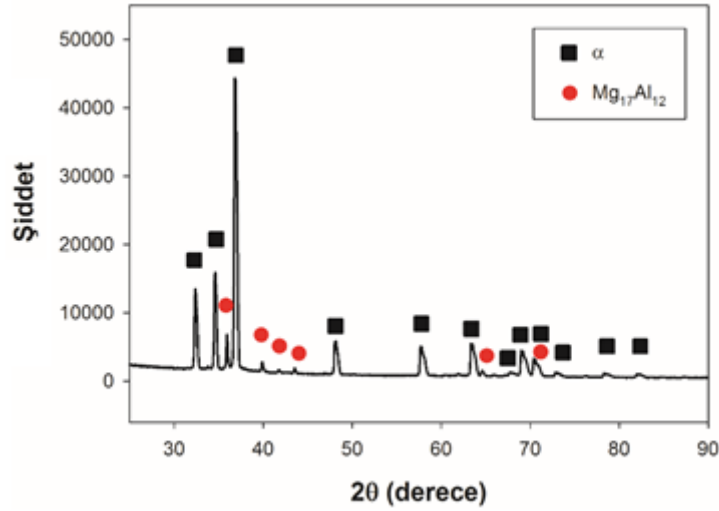
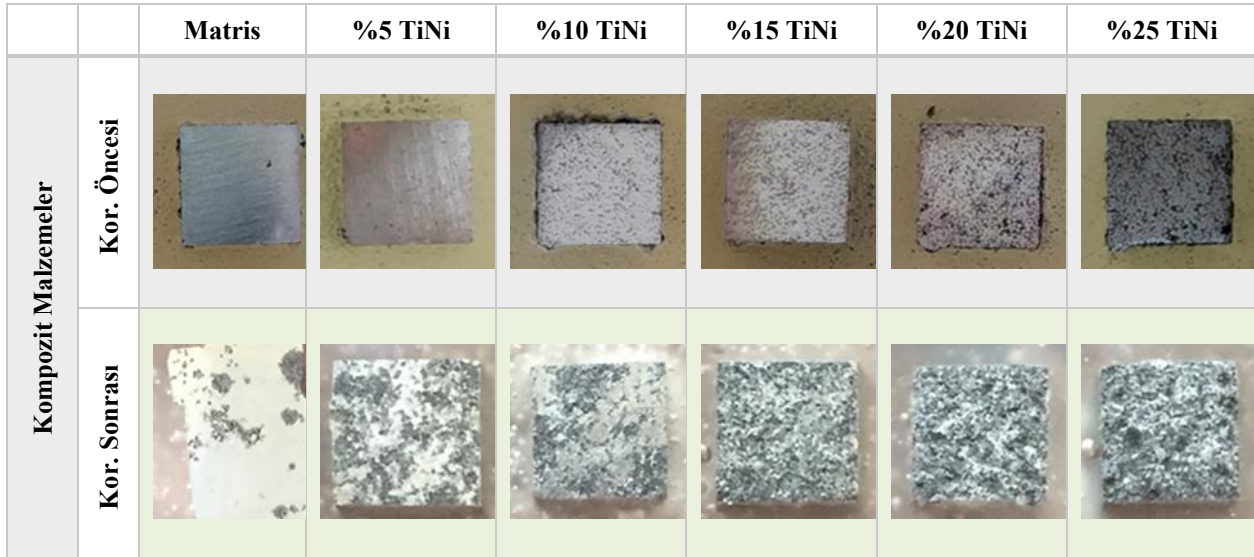
azaltmakta, bu durum, yüzeydeki MgO miktarının düşmesine neden olmaktadır. Buna bağlı olarak oksit tabakada meydana gelen süreksizlikler pasif yapıda doku bozukluğuna yol açarak kırılma ve yarılmalara neden olan bası gerilmelerini oluşturabilir. Ortamdaki klor iyonları bu hasarlı yapılara sızarak, çeşitli magnezyum tuzlarını oluşturup hem numunelerin çözünmesini hızlandırmakta hem de koruyucu filmin parçalanarak dağılmasına sebep olmaktadır (Lindström et. al., 2004, Hillis, 2006, Arrabal et. al., 2015). Ayrıca soy karakterdeki güçlendirici (Hodgson et. al., 1990), bünyedeki katot oranını artırarak küçük anot/büyük katot olarak adlandırılan ektiyeye neden olup, numunelerin korozyon direncini düşürmüş olabilir. Diğer taraftan yüzeyde oluşan oksit film tabakası MgO ve Mg(OH)₂ karma yapısı haricinde, Mg-Al karma oksit yapılarını da ihtiva etmektedir. Bu yapılar Al₂O₃ bakımından zengin olup, koruyuculukları alüminyum içeriğine bağlı olarak değişmektedir (Song and Atrens 1999). Dahası β fazındaki alüminyum miktarının, matrise kıyasla daha fazla olması, üzerindeki oksit yapının, numunenin diğer bölgelerine nazaran daha soy karakterde olacağını göstermektedir. Yapılan çalışmalarda intermetalik bileşiğin %5 NaCl çözeltisi içerisindeki korozyon potansiyeli değerinin -1.2 V olduğu ifade edilmektedir (Song and Atrens 2003). Dolayısıyla başlangıç tozlarında yer alan β fazı (Şekil 2) matris faza göre daha soy bir değere sahiptir. Anodik polarizasyon sırasında gerek yüzeyde oluşan alüminyum içerikli karma oksit yapıları gerekse de β fazının fiziksel bir bariyer gibi davranması kompozit malzemelerin korozyon hızındaki artışı kısıtlamıştır. Nitekim yapılan çalışmalarda, intermetalik bileşiğin matris faz içerisindeki hacimsel oranına bağlı olarak, $V_{\beta} > V_{\alpha}$ olması halinde, aşımında korozyon oluşumunu engellediği belirtilmiştir (Ballerini et. al., 2005, Zeng et. al., 2006). Morfolojik incelemelerde tüm numunelerde çukurcuk korozyonu türüne rastlanılmıştır. Literatürde magnezyum matrisli malzemelerin klorlu ortamlarda çukurcuk şeklinde korozyona uğradığı ifade edilmektedir (Andrei et. al., 2002, Ghali et. al., 2004, Kelen vd., 2019, 2021b, Çevik et. al. 2021). Şekil 3 ve 4'te sırasıyla makro ölçek ve SEM görüntüleri verilen tüm kompozit malzemelerde çukurcuk korozyonunun yoğun olarak matris/takviye ara yüzünde teşekkül ettiği görülmüştür. Soy karakterdeki fazların katot, matris fazın anot olarak davranması sonucu korozyon direncinin bu bölgelerde düştüğü saptanmıştır. Kompozit malzemelerde tanelerarası korozyon çatlaması sıklıkla tane sınırlarında ya da takviye fazı sınırları boyunca gözlenmiştir (Şekil 4c). Deneysel çalışmalarda bu aşım serilerinde alüminyumun çatlak ilerlemesine katkı sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca gevrek yapıdaki β fazı çatlak ilerlemesini artırmaktadır. Bu fazının korozyon dayanımını iyileştirmesindeki ana faktör tane sınırlarının dislokasyon hareketlerini kısıtlayarak korozyona karşı fiziksel bir bariyer şeklinde hareket etmesidir. Bu nedenle Mg₁₇Al₁₂ intermetalik bileşiğin yapı içerisindeki dağılımı gerek mekanik özellikler gerekse de korozyon dayanımı açısından büyük önem arz etmektedir (Hamu et. al., 2009, Aung and Zhou 2010, Aydoğmuş vd., 2020).



Şekil 1. Kompozit malzemelerin açık devre potansiyel (OCP) ve potansiyodinamik polarizasyon (PDS) eğrileri (a) OCP, (b) PDS (Open circuit potential (OCP) and potentiodynamic polarization (PDS) curves of composite materials (a) OCP, (b) PDS)

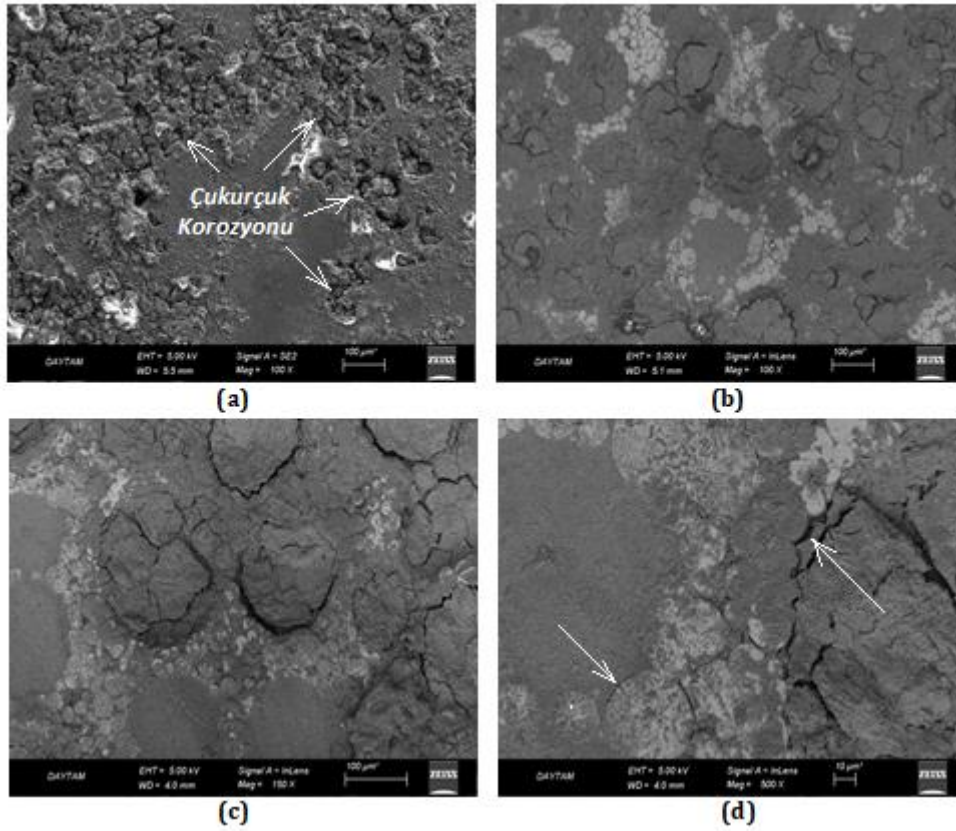
Tablo 2. Kompozit malzemelerin polarizasyon analizlerinden elde edilen önemli bazı korozyon parametreleri (Some important corrosion parameters obtained from polarization analyzes of composite materials)

Matris Faz	Takviye oranı (%)	E_{ocp} (mV)	E_{corr} (mV)	I_{corr} (mA/cm ²)	Beta A (mV/dec.)	Beta C (mV/dec.)	Korozyon Hızı (mpy) x10 ³
AZ91	5	-1545	-1518	3.32	48	290	2.65
	10	-1543	-1504	4.85	70	388	3.68
	15	-1534	-1496	6.42	84	282	4.67
	20	-1527	-1489	8.95	119	431	6.30
	25	-1519	-1468	10.80	188	935	13.01

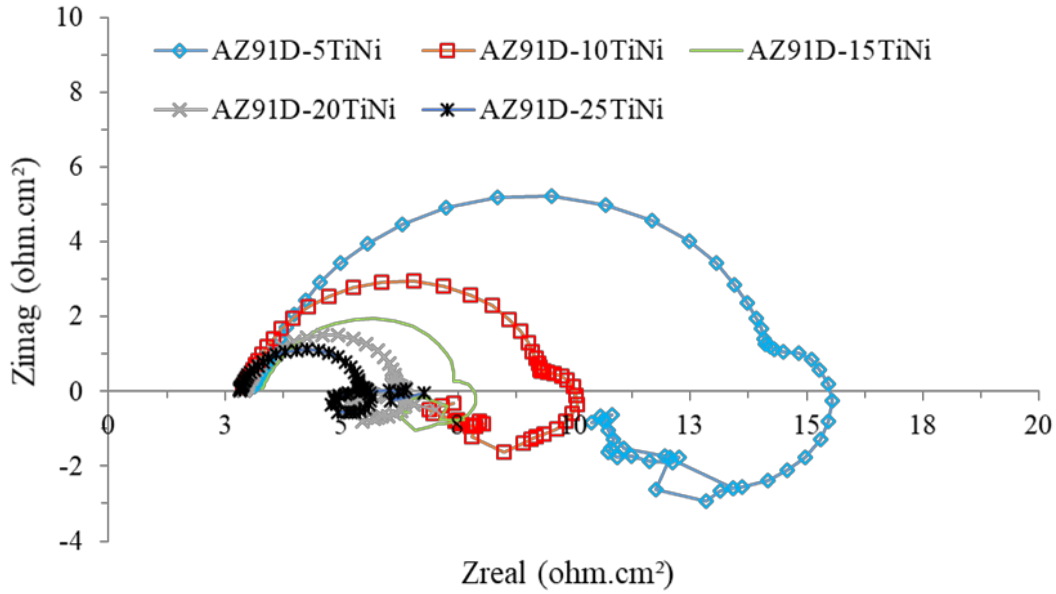
**Şekil 2.** Matris tozlarının XRD paternleri (XRD patterns of matrix powders)**Şekil 3.** Kompozit malzemelerin korozyon öncesi ve sonrası makroskobik görüntüleri (Microscopic images of composite materials before and after corrosion)

Alüminyumun matris faz yüzeyinde meydana gelen hidroksit film tabakasının morfolojisini değiştirerek korozyon özelliklerini geliştirdiği açıkça ifade edilebilir. Zira farklı alaşımlar ile aynı özellikteki çözelti içerisine yapılan daldırma testlerinde AZ31'de ağırlık kaybının 55.2 mg/cm², AZ80'da 0.75 mg/cm², AZ91D'de ise 1.05 mg/cm² olduğu tespit edilmiştir (Pardo et. al., 2008, Ghali, 2010, Song and Atrens 2003). Dolayısıyla alüminyum içeriğinin artmasıyla korozyon dayanımının iyileştiği görülmektedir. Buna ilaveten alaşımdaki çinko elementi matrisin

elektrokimyasal olarak daha soy olmasını sağlamaktadır. Takviye materyali ile birlikte artan soy karakter, numunelerin korozyon dayanımını geliştirerek direncin düşmesini sınırlandırmıştır. Proses sürecinde takviye elemanlarının korozyona uğramadığı, korozyonun tercihli olarak ara yüzeyde ilerlediği, matriste meydana gelen çözünme sonucu güçlendirici etrafının boşaldığı ve yapıdan koparak ayrıldığı belirlenmiştir (Şekil 3d). Ayrıca yerel olarak topaklanan takviye materyalleri lokal katot oranını artırarak küçük anot/büyük katot olarak ifade edilen korozyon türüne yol açmaktadır. Bu korozyon mekanizması çok hızlı cereyan ederek çukurcukların derinlemesine büyümesine ve güçlendirici partiküllerin yapıdan ayrılmasına neden olmaktadır. Şekil 5'te kompozit malzemelerin elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) analizleri sonrası Nyquist grafikleri verilmiştir. Bu eğrilerden yüksek frekanstan ortak frekans bölgesine kapasitif bir dairenin oluşumu ve düşük frekans bölgesinde indüktif bir döngünün varlığı dikkat çekmektedir. Numunelerde takviye miktarının artması ile birlikte çapın fark edilir düzeyde küçüldüğü görülmektedir. Bu davranış oksit film dayanımı ile ilgili olup, azalan yarıçap, oksit tabakada direncinin düştüğünü göstermektedir. Diğer bir ifade ile yüzeyde meydana gelen koruyucu tabaka oldukça kalın, gözenekli, kırılğan ve dayanıksızdır. Burada dikkat edilmesi gereken husus eğrilerin başlangıcında oluşan çok yüksek reel empedanstan da görülebileceği üzere kullanılan çözeltinin yüksek dirençli olmasıdır. Zira yüksek direnç numune/çözelti ara yüzeyinde faradik proseslerin, difüzyonun, proses sırasında da devam ettiğini göstermektedir. Kompozit malzemeler otomotiv güç aktarma organları imalatında kullanılmak üzere geliştirildiğinden, ASTM tarafından bu aksamlar için belirlenen test çözeltileri standartları (Baboian, 2005), göz önünde bulundurularak deneysel çalışmalarda yüksek dirençli solüsyon tercih edilmiştir. Ortamdaki yüksek klor iyonu konsantrasyonu yüzeydeki koruyucu tabakaya bunların absorpsiyonunu artırmaktadır. Kapasitif dirençteki azalma numunelerin düşük korozyon dayanıma atfedilmektedir. Düşük frekanslarda gözlemlenen indüktif döngü ise ağırlık kaybının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4. Kompozit malzemelerin SEM görüntüleri a) %5TiNi, b) %15TiNi ve c-d) % 25TiNi (SEM images of composite materials a) 5%TiNi, b) 15%TiNi and c-d) 25%TiNi)



Şekil 5. Kompozit malzemelerin elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) eğrileri (Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) curves of composite materials)

4. Sonuç (Conclusion)

Kompozit malzemelerin korozyon testlerinde tüm numunelerin açık devre potansiyel değişimlerinin zamanla arttığı gözlenmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon analizlerinde ise korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) değerlerinin artan takviye oranı ile birlikte arttığı tespit edilmiştir. Korozyon sonrası gerçekleştirilen morfolojik incelemelerde tüm numunelerde çukurcuk korozyonu gözlenmiştir. Matris fazın yüksek elektronegatif potansiyeli ve yüksek agresif çözelti koruyucu oksit tabakada hasarlara neden olduğu saptanmıştır. Başlangıç tozlarında yer alan β ($Mg_{17}Al_{12}$) çökeltileri ve yüzey morfolojisindeki homojensizliklerin kompozit malzemelerin korozyon dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmaya maddi olarak sağladıkları katkıdan dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (Proje No: 215M808) ve Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığı'na (Proje No: 2015-FBE-D275), 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)

- Andrei, M., Eliezer, A., Bonora, P. L., Gutman, E. M., 2002. DC and AC Polarisation Study on Magnesium Alloys Influence of the Mechanical Deformation, *Materials and corrosion*, 53(7), 455-461.
- Arrabal, R., Mingo, B., Pardo, A., Matykina, E., Mohedano, M., Merino, M. C., Rivas, A., Maroto, A., 2015. Role of Alloyed Nd in the Microstructure and Atmospheric Corrosion of as-cast Magnesium Alloy AZ91, *Corrosion Science*, 97, 38-48.
- Aung, N. N., Zhou, W., 2010. Effect of grain size and twins on corrosion behaviour of AZ31B magnesium alloy, *Corrosion Science*, 52(2), 589-594.
- Aydogmus T., 2015. Processing of interpenetrating Mg-TiNi composites by spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering A*, 624: 261-270.
- Aydoğmuş, T., Kelen, F., Aydemir, E., 2020. Sıcak Presleme Yöntemi ile AZ91 Magnezyum Alaşımının Üretimi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 277-287.
- Baboian, R., 2005. *Automotive*, Baboian R. (Ed.), *Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation-Second Edition*, içinde (s. 673-687.). ASTM international, West Conshohocken; U.S.A.
- Ballerini, G., Bardi, U., Bignucolo, R., Ceraolo, G., 2005. About some corrosion mechanisms of AZ91D magnesium alloy, *Corrosion Science*, 47(9), 2173-2184.
- Esen Z., 2012. The effect of processing routes on the structure and properties of magnesium-TiNi composites. *Materials Science and Engineering A*, 558: 632-640.

- Fink, R., 2003. Die Casting Magnesium, Kainer, K. U. (Edt.), Magnesium Alloys and Technology, içinde (s. 23-44.). WILEY-VCH Verlag, Germany.
- Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F., Wu, S., 1996. Potential automotive uses of wrought magnesium alloys (No. ANL/ES/CP-89958; CONF-9604136-21), Argonne National Lab, IL 60439, USA.
- Ghali, E., 2010. Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys: understanding, performance, and testing (Vol. 12). John Wiley & Sons.
- Ghali E., Dietzel W., Kainer K.U. 2004. General and localized corrosion of magnesium alloys: a critical review. Journal of Materials Engineering and Performance, 13 (1): 7-23.
- Hamu, G. B., Eliezer, D., Wagner, L., 2009. The relation between severe plastic deformation microstructure and corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy, Journal of alloys and compounds, 468(1-2), 222-229.
- Hassan S.F., Gupta M. 2002. Development of a novel magnesium/nickel composite with improved mechanical properties. Journal of alloys and compounds, 335 (1-2): L10-L15.
- Hillis, J., 2006. Corrosion, Friedrich, H. E., Mordike, B. L. (Ed.), Magnesium Technology, içinde (s. 469-498.). Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Hodgson, D.E., Wu M.H., Biermann R.J. 1990. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, içinde (s. 2: 897-902.). ASM Handbook Committee, U.S.A.
- Kelen, F., 2014. Motorlu taşıt emisyonlarının insan sağlığı ve çevre üzerine etkileri. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19(1-2), 80-87.
- Kelen, F., 2021, Magnezyum ve Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisindeki Önemi ve Uygulamaları, Iğdır Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 11(1), 548-562.
- Kelen, F., Gavgalı, M., Aydoğmuş, T., 2018. Microstructure and mechanical properties of a novel TiNi particulate reinforced AZ91 metal matrix composite. Materials Letters, 233, 12-15.
- Kelen, F., Aydoğmuş, T., Gavgalı, M., Dikici, B., 2019. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş magnezyum matrisli kompozitlerin korozyon duyarlılıkları. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(3), 914-920.
- Kelen, F., Aydoğmuş, T., Gavgalı, M., 2022. Tek Eksenli Sıcak Presleme Tekniği İle İmal Edilen Magnezyum Matrisli Kompozitlerin Korozyon Davranışlarının İncelenmesi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12 (1), 34-41.
- Çevik, E., Gündoğan, M., İncesu, A., Turan, M. E., 2021. Corrosion behavior of graphene nanoplatelet-coated TiB2 reinforced AZ91 magnesium matrix semi-ceramic hybrid composites, Hittite Journal of Science and Engineering, 8(1), 27-33.
- Lindström, R., Johansson, L. G., Thompson, G. E., Skeldon, P., Svensson, J. E., 2004. Corrosion of magnesium in humid air, Corrosion Science, 46(5), 1141-1158.
- Nguyen, Q.B., Gupta, M., 2010. Enhancing mechanical response of AZ31B using Cu+ nano-Al2O3 addition. Materials Science and Engineering A, 527 (6): 1411-1416.
- Pardo, A., Merino, M. C., Coy, A. E., Arrabal, R., Viejo, F., Matykina, E., 2008. Corrosion behaviour of magnesium/aluminium alloys in 3.5 wt.% NaCl, Corrosion Science, 50(3), 823-834.
- Song, G., Atrens, A., 2003. Understanding magnesium corrosion—a framework for improved alloy performance, Advanced engineering materials, 5(12), 837-858.
- Song, G. L., Atrens, A., 1999. Corrosion mechanisms of magnesium alloys, Advanced engineering materials, 1(1), 11-33.
- Zeng, R. C., Zhang, J., Huang, W. J., Dietzel, W., Kainer, K. U., Blawert, C., Wei, K. E., 2006. Review of studies on corrosion of magnesium alloys, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 16, 763-771.



EDİRNE İKLİM ŞARTLARINDA ÇEVRE SICAKLIĞI VE RÜZGAR HIZININ POLİKİKRİSTAL FOTOVOLTAİK PANEL ÇIKIŞ GÜCÜNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Dinçer AKAL¹, Ahmet Erhan AKAN^{*2}

¹ Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne, Türkiye

² Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Meslek Yüksekokulu, Makine Programı, Tekirdağ, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Güneş Enerjisi,
Fotovoltaik,
Çevre Sıcaklığı,
Rüzgar Hızı,
Güç.

Öz

Bu çalışmada, Edirne ilinde kurulu bir polikristal fotovoltaik panelli güneş enerjisi sisteminin performansının çevre sıcaklığı ve rüzgar hızı ile değişimi araştırılarak, bu unsurların fotovoltaik sistem performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla 1 Ağustos – 30 Eylül 2020 tarihleri arasında yapılan deneyde kullanılan sensörler aracılığı ile ölçülen iklimsel veriler ile panel çıkış gücü ve akım değerleri, sisteme bağlı bulunan Arduino Mega mikro işlemci karttaki yazılım vasıtasıyla hafıza kartına (SD kart) 10 dakika aralıklarla aktarılması sonucu elde edilmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre, ortam sıcaklığındaki artışın fotovoltaik panellerin sıcaklığını arttırdığı, güneş radyasyonu miktarının ise üretilen elektriği doğru oranda etkilediği tespit edilmiştir. Fotovoltaik panel performansına rüzgâr hızının etkileri değerlendirildiğinde ise, rüzgâr hızının artan değerlerinde panel sıcaklıklarının düştüğü tespit edilmiş, fakat incelenen bölge için belirlenen nominal rüzgar hızlarının sayısının çok düşük değerlerde olduğu bu sebeple panellerin soğutulmasında rüzgarın direkt soğutucu olarak kullanılmasının yetersiz olacağı, panellerin soğutulması için yardımcı soğutma sistemlerinin kullanılması durumunda panellerin çıkış gücünün artacağı sonucuna varılmıştır.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF AMBIENT TEMPERATURE AND WIND SPEED ON POLYCRYSTAL PHOTOVOLTAIC PANEL OUTPUT POWER IN EDİRNE CLIMATE CONDITIONS

Keywords

Solar Energy,
Photovoltaic,
Ambient Temperature,
Wind Speed,
Power.

Abstract

In this study, the variation of the performance of a solar energy system with polycrystalline photovoltaic panels installed in Edirne province with ambient temperature and wind speed was investigated, and effects of these elements on photovoltaic system performance were investigated. For this purpose, climatic data measured by sensors used in the experiment carried out between 1 August and 30 September 2020, as well as panel output power and current values, were obtained as a result of transferring Arduino Mega microprocessor card to memory card (SD card) at 10-minute intervals through the software on the system. According to the findings, an increase in ambient temperature increases the panels' temperature, and solar radiation affects electricity produced at a direct proportion rate. When the effects of wind speed on photovoltaic panel performance were evaluated, it was determined that panel temperatures decreased with increasing wind speed values. However, it has been determined that number of nominal wind speeds determined for the examined region is very low, so it will be insufficient to use the wind as a direct cooler for cooling panels. It has been concluded that output power of the panels will increase if auxiliary cooling systems are used for cooling panels.

Alıntı / Cite

Akal, D., Akan, A.E., (2022). Edirne İklim Şartlarında Çevre Sıcaklığı ve Rüzgar Hızının Polikristal Fotovoltaik Panel Çıkış Gücüne Etkilerinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 91-102.

* İlgili yazar / Coresponding author: aeakan@nku.edu.tr, +90-282-250-3546

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
D. Akal, 0000-0003-0055-5471	Başvuru Tarihi / Submission Date	07.06.2021
A.E. Akan, 0000-0003-1806-7943	Revizyon Tarihi / Revision Date	25.10.2021
	Kabul Tarihi / Accepted Date	16.11.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Fotovoltaik (PV) güneş enerjisi sistemi, güneş ışığını elektriğe dönüştüren ve yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimi için gelecek vaat eden sistemlerden biri olarak anılmaktadır (Durusu vd., 2020). PV panellerde, güneş enerjisinden elektrik enerjisine dönüşüm güneş hücreleri kullanılarak yapılmaktadır. Bu hücreler, yüzeyine gelen güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren P-N eklemlerinden oluşmaktadır. Güneş hücrelerinde oluşan elektrik enerjisinin ana kaynağı fotovoltaik yüzeye dik gelen güneş ışınımıdır. Güneş panellerinden çıkış gücünü arttırmak için çok sayıda hücre bir birine seri veya paralel bağlanır ve ortaya çıkan bu yapıya fotovoltaik modül (PV modül) adı verilmektedir. Fotovoltaik hücrelerde verim; güneş hücresinden elde edilen çıkış gücünün güneş hücresine gelen güneş enerjisine oranı olarak ifade edilmektedir. Fotovoltaik panellerden elde edilecek verim; öncelikle hücre üzerine gelen ışınım miktarına, panel yüzey alanına, panelin yatayla yaptığı açığa, panel karakteristik özelliklerine, gölgelenme, rüzgar hızı, tozlanma faktörü, yansıma kayıpları, çevre ve panel yüzeyi sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Fotovoltaik sistemlerin verimliliklerinin artırılabilmesi için fotovoltaik dizideki modüllerin maksimum güç noktalarında çalıştırılması gerekmektedir (Bingöl ve Özkaya, 2019). Güneş ışınımı, optik kayıplardan dolayı her zaman istenilenden daha düşük bir değerde elde edilebilmektedir. Genellikle güneş hücreleri $0,30 \times 10^{-6}$ ile $1,10 \times 10^{-6}$ m arasındaki spektral aralıklarda cevap vermektedir. Spesifik olarak dar bir bant aralığında ancak %50 verim aşılabilmektedir (Adreolli, 2015). Verimi etkileyen önemli faktörlerden biriside panel sıcaklığıdır. Yükselen panel sıcaklık değeri yarı-iletkenin bant aralığını azalttığı için silikon hücrelerde her 1°C sıcaklık artışı için tahmin edilen enerji üretimini % 0.5 düşmektedir (Adreolli, 2015). Ayrıca, fotovoltaik panel çıkışının yüke bağlı olarak büyük oranda değişim göstermesi bu sistemlerin tasarım ve optimizasyon sürecinde karşılaşılan önemli bir sorundur (Işiker vd., 2006).

Atmaca ve Pekdemirli (2020), tarafından yapılan deneysel bir çalışmada güneş ışınımının anlık değişiminin, panel sıcaklığında da anlık değişimlere neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, ışınım miktarının artması ile fotovoltaik hücrenin sıcaklığının artmakta olduğu, güneş ışınımının azaldığı anlarda ise modül sıcaklıklarında da azalma görüldüğü bildirilmiştir. Buna ek olarak, güneş ışınımı, hava sıcaklığı ve rüzgar hızının, fotovoltaik panel yüzey sıcaklığını önemli derecede etkilediğini tespit etmişlerdir. Diğer bir atmosferik koşul olan rüzgar hızı, panel çıkış gücünü önemli derecede etkilemektedir. Rüzgarın etkisi ile fotovoltaik panelin yüzeyinde bir miktar soğuma ve PV modelindeki paralel direnci azaltması sebebiyle panel çıkış gücünde bir miktar artış sağlanır (Bashir vd., 2020; Schwingshackl vd., 2013). Fotovoltaik modüllerin çalışma sıcaklığı, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşüm sürecindeki faktörlerin merkezindedir. Panel çıkış gücü artan modül sıcaklığı ile azalır ve fotovoltaik panellerin ısı tepkisi, modülü etkileyen iklim koşullarına göre değişmektedir. Bu nedenle, modül sıcaklığının sabit durum modeli pek mümkün değildir. Lobera ve Valkealahti (2013), tarafından yapılan bir çalışmada fotovoltaik modüllerin toplam enerji dengesine dayalı dinamik termal bir model teorik olarak geliştirilmiştir. Goossens vd., (2018), tarafından yapılan bir çalışmada ise rüzgar hızının 1-5 m/s olduğu şartlarda yapılan deneylerde, sıcaklık etkisi, elektriksel özellikler ve binaya entegre edilen eğimli fotovoltaik modüllerin arasındaki hava boşluğunun etkisi araştırılmıştır. Araştırmada elde edilen bulgulara göre panel ile bina yüzeyi arasındaki hava boşluğunun panel çıkış gücünü etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca PV modüllerin seri olarak bağlanması durumunda çalışma sıcaklığının direkt olarak açık devre voltajını etkilediğini belirtmişlerdir. Tüm modüllerin açık devre voltajı ve dolayısıyla panel güç çıkışı, her bir güneş pilinin davranışı tarafından belirlenmiş ve yapılan testlerde 5,5 cm hava boşluğu ile en iyi performansın elde edildiği bildirilmiştir. Akyüz vd., (2012), tarafından yapılan bir çalışmada ise, Türkiye'de kurulu bir PV sisteminden elde edilen gerçek deneysel veriler kullanılarak iki durum için ekserji verimliliğinin değişimleri araştırılmıştır. Ekserji verimliliğini formüle etmek için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, ortam sıcaklığının ve fotovoltaik hücre sıcaklığının panelden elde edilecek enerji verimliliğinin üzerinde büyük etkisi olduğu, ek olarak, PV sisteminin ekserji verimliliği güneş ışınımı ve rüzgar hızına bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir.

Malzeme ve tasarım parametrelerinin yanı sıra, PV hücresinin performansını etkileyebilecek toz, nem ve rüzgar hızı gibi önemli faktörler de vardır. Mekhilef vd., (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, toz birikimi, nem seviyesi ve rüzgar hızının etkisi ayrı ayrı ele alınarak her birinin diğerine etkisi araştırılmıştır. Bu üç faktörün her birinin diğer ikisini etkilediği ve güneş pili tasarımı hakkında derinlemesine bir fikir sahibi olmak için bu faktörlerin etkisinin bir bütün olarak dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır. PV sistemlerin verimlerinin artırılması üzerine yapılan farklı bir çalışmada ise Chandra vd., (2018) tarafından ele alınmıştır. Yapılan bu çalışmaya göre, Hindistan'ın sıcak ve kuru iklim bölgesinde bulunan GLA Üniversitesi laboratuvarında, özellikle rüzgar etkisini araştırmak amacıyla bir deneysel çalışma yapılmıştır. Aynı panel çıkış gücüne sahip iki adet

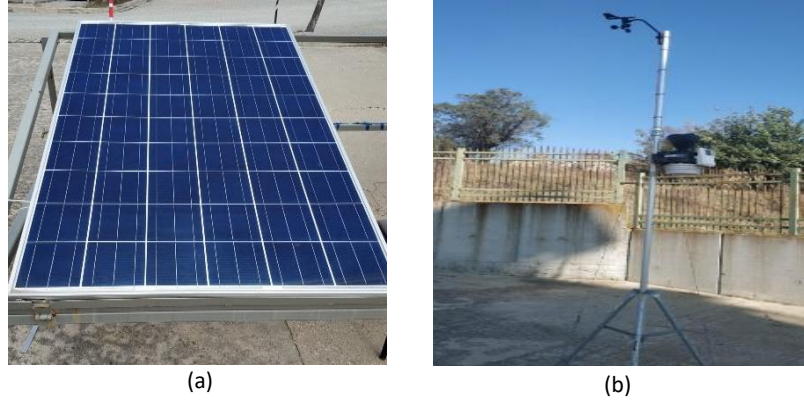
fotovoltaik modül üzerinde mevsimsel deneyler gerçekleştirilmiştir. Artan modül sıcaklığının panel çıkış gücünü olumsuz etkilediği, bunu telafi etmek için eklenen ek soğutma tasarımları ile elde edilen enerji miktarının ise %7,69 oranında arttığı bildirilmiştir. Gedik (2016), tarafından Modül sıcaklığının fotovoltaik panel üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir çalışmada ise, Karabükte yapılan deneysel bir araştırma ile PV panel üzerindeki sıcaklık artışının etkileri incelenmiştir. Ortam sıcaklığının verim üzerinde büyük öneme sahip olduğu gözlemlenmiştir. Panellerin bulunduğu ortam sıcaklığı sırasıyla 10, 20, 30 ve 40 °C olmak üzere 4 farklı sıcaklık koşulunda modül verimleri test edilmiştir. Deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde modül hücre sıcaklığının artışı ile panel çıkış gücünün azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca modül sıcaklığının düşürülmesi için fotovoltaik panellerin aktif veya pasif olarak soğutulması gerektiği ifade edilmektedir.

Bu çalışmalara ek olarak, elektrikli ve hibrit araçlarda fotovoltaik hücrelerin kullanılması durumunda, sıcaklığın verimliliğe etkisi ve modellenmesi araştırılmıştır. Gerçek meteorolojik şartlarda yapılan çalışmada sıcaklığın artması ile araçların özellikle park etme sürelerinde fotovoltaik veriminin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca park edilmiş aracın iç sıcaklığının 50°C'nin üzerine çıkması halinde modül veriminde % 8'e varan azalmalar gözlemlendiği, bu sebeple bu tür araçların park etmeleri esnasında aracın kabin havalandırmasının önemli olduğu ifade edilmiştir (Tiano vd., 2020). Keçebaş vd., (2021) tarafından yapılan bir çalışmada ise 3 farklı özellikte optimize edilmiş PV panelin 3 ayrı durum kapsamında karşılaştırılmalı testleri yapılarak, güç üretimi ve verimi en yüksek PV panel tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen PV paneller 4 gün boyunca birer saat arayla sırasıyla güneşe Sabit Açılı (SA), taşıt Park Durumu (PD) ve taşıtın Sürüş Durumu (SD) olmak üzere 3 farklı durum için panellerden elde edilen elektriksel güç ölçümleri multimetre aracılığıyla yapılmıştır. Elde ettikleri sonuca göre, sabit açılı faz değiştiren malzemeli-yoğunlaştırıcı PV panelinin sabit açılı Normal-PV panele göre elektriksel güç üretiminde %47'lik bir verim artışının sağlandığını ifade etmişlerdir. Fotovoltaik panellerde her bir katman için dikkate alınan fiziksel özellikler, özgül ısı kapasitesi, yoğunluk, termal iletkenlik, ışınım absorpsiyonu ve kalınlık genellikle ihmal edilen faktörlerdir. Dikkate alınan meteorolojik faktörler genel olarak, ortam sıcaklığı, ışınım şiddeti, rüzgar hızı ve montaj özellikleridir. Geliştirilen termal model ile bu faktörlerin her biri değiştirilerek hem sabit durum hem de geçici durum analizleri yapıldığında her bir faktörün PV panel performansı üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak anlaşılabilir. Elde edilen analiz sonuçları kullanılarak, modül tasarımları ve modellerle fotovoltaik panel çıkışı maksimum seviyeye çıkartılabilir (Aly vd., 2019).

Bu çalışmada, Edirne ilinde kurulumu yapılmış polikristal fotovoltaik panelin özellikle yaz aylarındaki performansının, çevre sıcaklığı ve rüzgar hızı ile değişimi incelenmiştir. PV panellerin kullanımı esnasında artan panel sıcaklıklarını, atmosferik koşullar yardımı ile nominal değerlerde tutulmasının amaçlandığı bu çalışmadan elde edilecek sonuçların, bölgedeki güneş enerjisi kullanımının geliştirilmesine, bu konuda çalışan araştırmacılara yararlı bilgiler sunacağı düşünülmektedir. Ayrıca, literatürde incelenen bölge referans alındığında, daha önce bu konuda yapılmış böyle bir çalışma bulunmaması ise çalışmanın literatür açısından da faydalı olacağını ortaya koymaktadır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

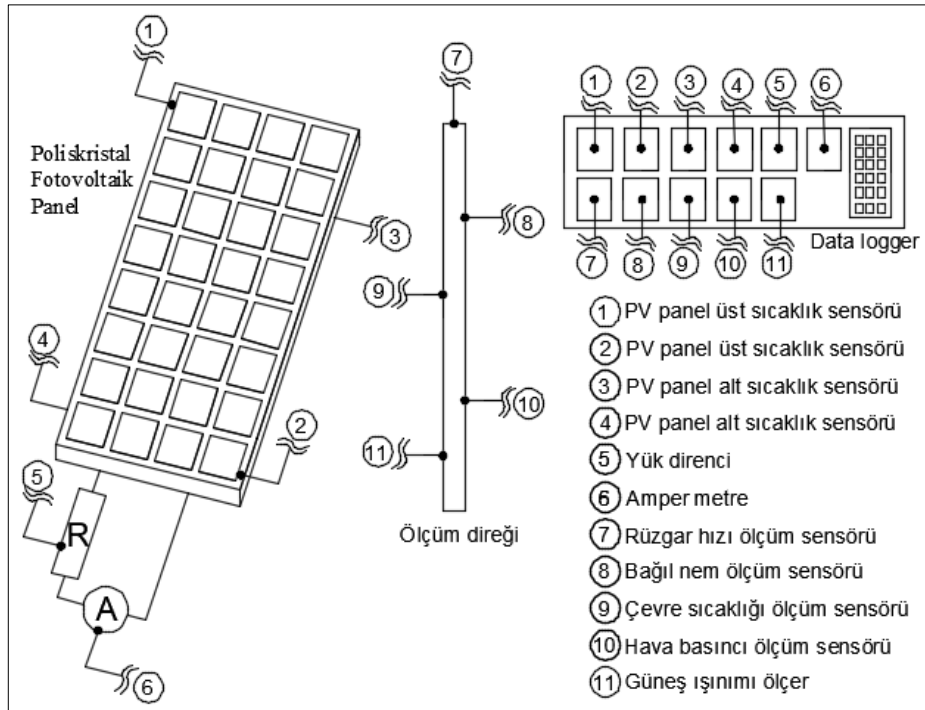
Güneş enerjisinden elektrik üretiminde, çevre şartlarının etkisini incelemek için, Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesinin güney yönünde polikristal modül fotovoltaik panel deney düzeneği kurulmuştur. Bu deney düzeneği öncelikle bir taşıyıcı sistem üzerinde, fotovoltaik panellerde üretilen elektrik enerjisinin zamana bağlı olarak gerilim ve akım değerlerini SD karta aktaran veri kaydedici, akü, panel çıkış gücü için yük dirençleri, sıcaklık sensörleri, güneş ışınım ölçer (piranometre), rüzgar ölçümü için anemometre ve bağlantı kablolarından oluşmaktadır. Deneyler Edirne coğrafi şartlarında yapıldığı için taşıyıcı 30° eğim açısı ile sabitlenmiştir (Şekil1). Kurulum tamamlandıktan sonra 01.08.2020 tarihinde sabah saat 07:00 de deneylere başlanmış akşam saat 19:00 kadar her 10 dakikada bir, 2 ay boyunca (Ağustos ve Eylül) panellerden elde edilen gerilim, akım değerleri ile birlikte, güneş ışınımı, çevre sıcaklığı ve rüzgar hızı değerleri 10'ar dakika aralıklar ile Şekil 1b'de gösterilen 3m yüksekliğindeki ölçüm istasyonu vasıtasıyla ölçülmüş ve SD karta kaydedilmiştir (Şekil 2). Deneysel sonuçlar incelendiğinde kurulumun yapıldığı yerdeki ışınım, sıcaklık ve rüzgar hızı değişimlerinin panel çıkış gücünü önemli derecede etkilediği görülmüştür. PV panele ait teknik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. (a) Fotovoltaik panel (Photovoltaic panel), (b) Ölçüm istasyonu (Measuring station)

Tablo 1. PV modülün teknik özellikleri (Technical specifications of PV module)

Güneş Modül Tipi	JKM 260P-60
Maximum Güç (P_{max})	260 W
Güç Toleransı	0~+3%
Maximum Güç Voltajı (V_{mp})	31,1 V
Maximum Güç Akım (I_{mp})	8,37 A
Açık Devre Voltajı (V_{oc})	38,1 V
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	8,98 A
Nominal Çalışma Hücre Sıcaklığı (NOCT)	45±2°C
Maximum Sistem Voltajı	1000 VDC
Maximum Sigorta Değeri	15 A
Çalışma Sıcaklığı	-40°C~+8°C
Uygulama Sınıfı	A
Ağırlık	18,5 kg
Boyutlar	1650×992×40 (mm)



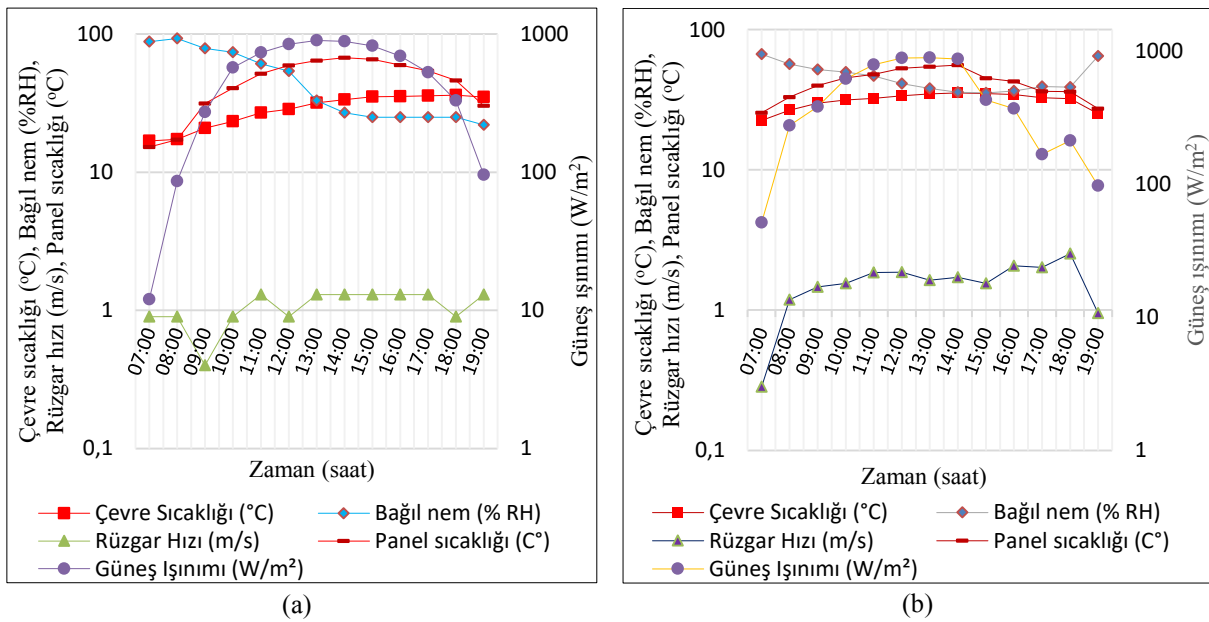
Şekil 2. Fotovoltaik panel kurulum devresi (Photovoltaic panel installation circuit)

3. Bulgular ve Tartışma (Findings and Discussion)

Fotovoltaik panellerden en iyi şekilde yararlanmak için yılın en sıcak zaman aralığı olan Ağustos ayı ile farklı atmosferik koşulların karşılaştırılması amacı ile Ağustos ayı ışınım şiddeti değerleri ile hemen hemen aynı ışınım şiddeti değerlerin görüldüğü Eylül ayı, incelemesi yapılan zaman periyodunun belirlenmesinde etkili olmuştur. Ölçüm yapılan parametreler; çevre sıcaklığı, bağıl nem, rüzgar hızı ve güneş ışınım miktarı ile panellerin sıcaklık değerleridir. Elde edilen veriler sayesinde, PV panellerin performansını oldukça etkiledikleri tahmin edilen çevre sıcaklığı ve rüzgar hızının etkileri araştırılmıştır. Elde edilen bulgular sırasıyla sunulmuştur.

3.1. Gözlemlenen Atmosferik Koşullar (Observed Atmospheric Conditions)

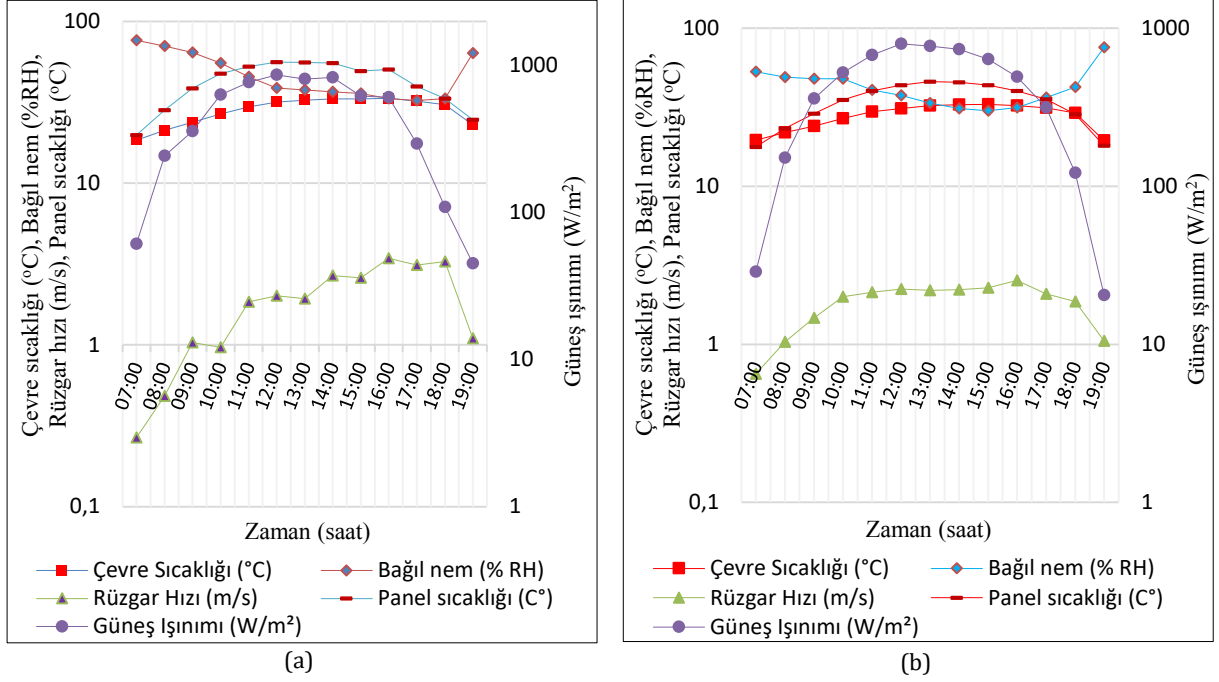
Ağustos ve Eylül ayları boyunca gerçekleşen atmosferik durumlar 10'ar dakika aralıklarla kayıt altına alınmış olmasına rağmen, elde edilen verilerin çok fazla olması anlaşılabilir bir grafik sunmayı zorlaştırmaktadır. Bu nedenle Ağustos ve Eylül aylarının 1. ve 15. günleri referans alınmış ve atmosferik parametrelerin saatlik ortalama değerlerinin değişimleri Şekil 3-4'de verilmiştir.



Şekil 3. (a) 1 Ağustos, (b) 1 Eylül tarihindeki atmosferik parametrelerin saatlik ortalama değişimleri ((a) 1 August, (b) 1 September, hourly average changes of atmospheric parameters)

Şekil 3'a incelendiğinde, 1 Ağustos tarihinde çevre sıcaklığının ortalama 22,56 ile 35,41 °C arasında değiştiği, en yüksek değerine ise saat 14:00 ile 15:00 arasında ulaştığı tespit edilmiştir. Bağıl nem değerinin ise ortalama %38,15 ile %66,66 (RH) arasında değiştiği, hava sıcaklığının artması ile bağıl nem değerlerinin azalmaya başladığı, en düşük bağıl nem değerlerine hava sıcaklığının en yüksek olduğu saatler olan 14:00 ile 15:00 arasında ulaşıldığı tespit edilmiştir. Rüzgar hızı değişimi incelendiğinde ise sabah saatlerinde en düşük hız değerlerinin görüldüğü, saat 16:00 ile 19:00 arasında rüzgarın en yüksek hızla estiği belirlenmiştir. Ayrıca, 1 Ağustos tarihinde ölçülen en düşük rüzgar hızı saat 07:00'de 0,28 m/s hızla eserken, en yüksek ortalama rüzgar hızının ise saat 18:00'de 2,53 m/s hızla estiği tespit edilmiştir. Güneş ışınım değerleri incelendiğinde ise en düşük güneş ışınım değerinin saat 07:00 de 51,66 W/m² değerinde olduğu, en yüksek güneş ışınımının ise 12-13:00 saatleri arasında gerçekleştiği belirlenmiştir. Atmosferik koşulların panel sıcaklığına etkisi incelendiğinde ise panel sıcaklığının, çevre sıcaklığı ve güneş ışınım miktarının artması ile arttığı, rüzgar hızı ve bağıl nem değerlerinin artması ile de azaldığı belirlenmiştir. Buna göre en yüksek ortalama panel sıcaklığı saat 14:00'de 55,98 °C olurken, en düşük panel sıcaklığının ise saat 07:00'de 25,58 W/m² olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 3'b incelendiğinde ise 1 Eylül tarihinde çevre sıcaklığının ortalama 16,9 ile 35,7 °C arasında değiştiği, bağıl nem değerlerinin ortalama %22 ile %93 (RH) arasında değiştiği, rüzgar hızının ise ortalama 0,9 ile 1,3 m/s arasında değiştiği, güneş ışınım değerlerinin ise ortalama 12 ile 899 W/m² arasında değiştiği, panel sıcaklıklarının ise ortalama 15,2 ile 67,46 °C arasında değiştiği tespit edilmiştir. Eylül ayı verileri Ağustos ayı verileri ile karşılaştırıldığında, genel olarak çevre sıcaklığının eylül ayında bir miktar düştüğü, bağıl nem değerlerinin arttığı, güneş ışınım değerlerinin ise özellikle saat 13'den sonra daha yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Panel sıcaklık değerleri incelendiğinde ise ortalama panel sıcaklıklarının saat 13:00'a kadar daha düşük, 13:00'den sonra ise daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

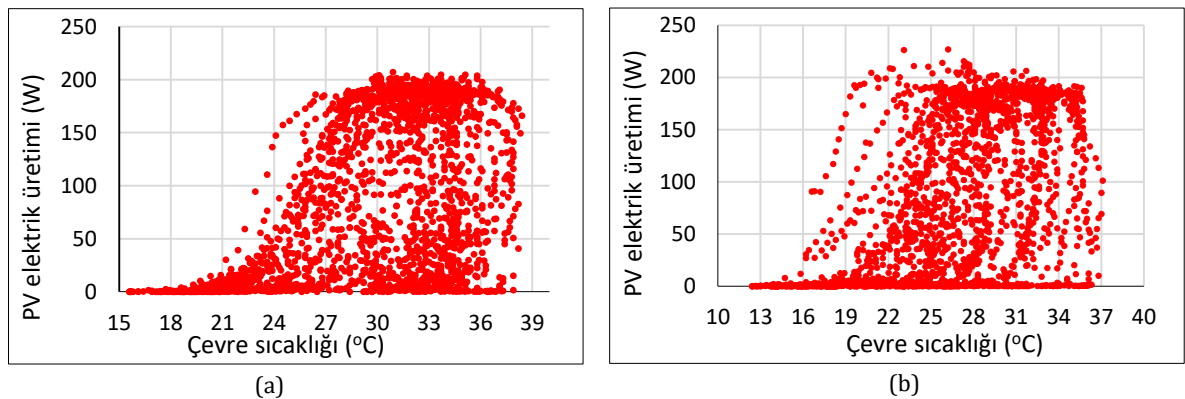


Şekil 4. (a) 15 Ağustos, (b) 15 Eylül, tarihlerindeki atmosferik parametrelerin saatlik ortalama değişimleri ((a) 15 August, (b) 15 September, hourly average changes of atmospheric parameters)

Şekil 4'de 15 Ağustos ve 15 Eylül tarihlerinde gerçekleşen atmosferik parametrelerin değişimleri görülmektedir. Şekil 4, Şekil 3 ile karşılaştırıldığında, atmosferik olayların göstermiş oldukları grafiksel eğilimlerin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. 15 Ağustos tarihi için atmosferik parametrelerin saatlik ortalama değişim değerleri incelendiğinde, ortalama çevre sıcaklığının 18,48 ile 33,51 °C arasında, ortalama bağıl nem değerlerinin %32,5 ile %76,5 (%RH) arasında, ortalama rüzgar hızı değerlerinin 0,28 ile 3,43 m/s arasında, ortalama güneş ışınım miktarının 60,83 ile 819,33 W/m² arasında, ortalama panel sıcaklıklarının ise 19,88 ile 56,01 °C arasında değiştiği tespit edilmiştir. 15 Eylül tarihinde gerçekleşen atmosferik parametrelerin saatlik ortalama değerleri incelendiğinde ise ortalama çevre sıcaklığı değerlerinin 19,55 ile 33,01 °C arasında, ortalama bağıl nem değerlerinin %30 ile %76 (%RH) arasında, ortalama rüzgar hızı değerlerinin 0,65 ile 2,53 m/s arasında, ortalama güneş ışınımı miktarının 20,5 ile 798,16 W/m² arasında, ortalama panel sıcaklık değerlerinin ise 17,76 ile 45,87 °C arasında değiştiği tespit edilmiştir.

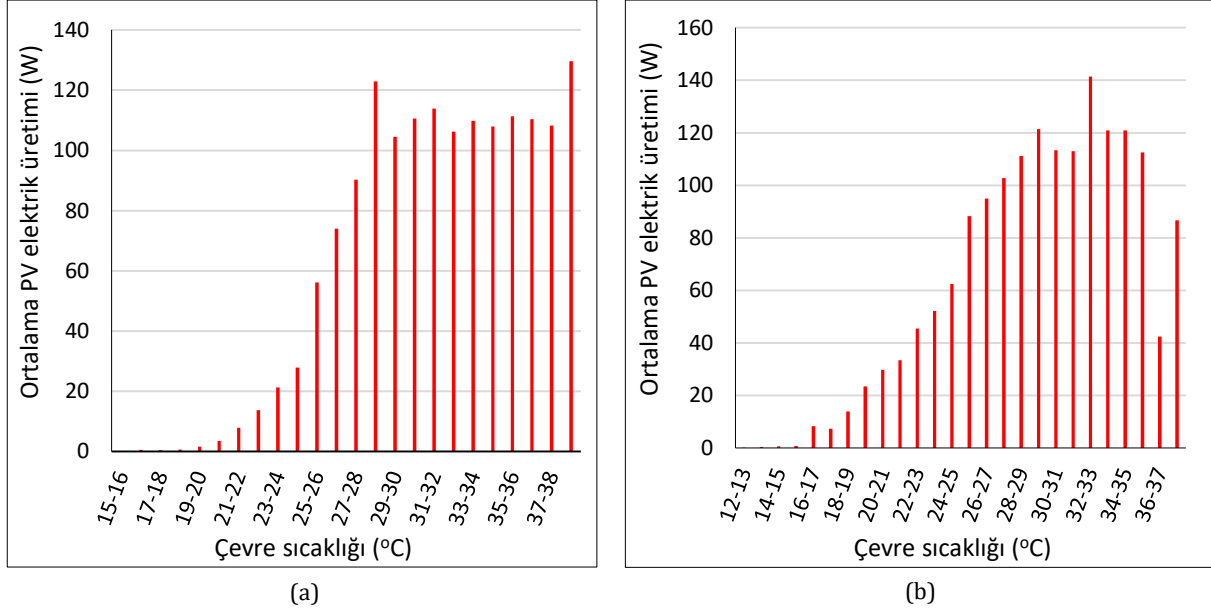
Yapılan deneysel çalışma ile 10'ar dakika aralıklar ile kaydedilen atmosferik verilerin PV panel performansı üzerindeki etkilerini belirlemek amacı ile PV modüllerde, aynı zaman diliminde kayıt altına alınan volt ve amper değerlerinden üretilen güç değerlerine ulaşılmıştır. Böylece her bir atmosferik parametrenin üretilen güç miktarına olan etkisi ayrı ayrı incelenebilmektedir. Elde edilen bulgular sırasıyla sunulmuştur.

3.2. Çevre Sıcaklığının PV Modül Güç Üretimine Etkisinin İncelenmesi (Investigation of the Effect of Ambient Temperature on PV Module Power Generation)



Şekil 5. (a) Ağustos, (b) Eylül aylarındaki atmosferik sıcaklık, PV elektrik üretimi saçılma grafiği ((a) August, (b) Atmospheric temperature in September, PV electricity generation scatterplot)

Şekil 5’de, Ağustos (a) ve Eylül (b), aylarında ölçülen çevre (atmosfer) sıcaklıklarının PV panel güç üretimine etkisi görülmektedir. Çevre sıcaklıklarının Ağustos ayında 15,6-38,40 °C arasında, Eylül ayında ise 12,40-37,10 °C arasında değişmesi sebebi ile veriler arasındaki kümeleşme, çevre sıcaklığı-üretilen elektriksel güç arasındaki bağıntının görülmesini zorlaştırmaktadır. Genel olarak, maksimum elektrik üretiminin yaklaşık olarak, Ağustos ayında 27-37 °C aralığında, Eylül ayında ise 26-36 °C aralığında olduğu görülebilmektedir. Daha net bulgular elde edebilmek için ölçülen sıcaklık değerleri ve bu değerlere karşılık gelen güç üretim değerleri 1’er derecelik gruplara ayrılarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 6’da sunulmuştur.

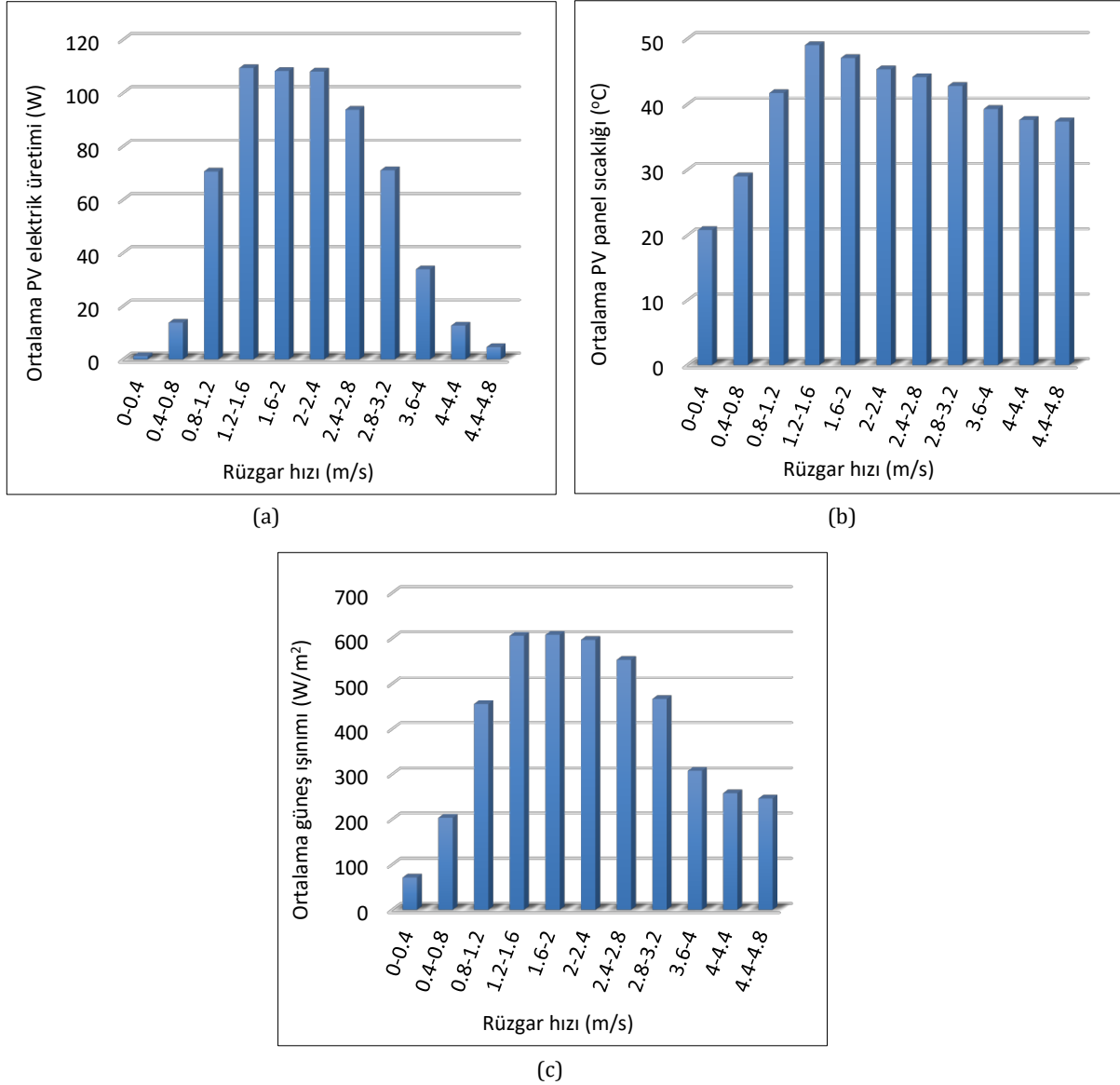


Şekil 6. (a) Ağustos, (b) Eylül aylarındaki çevre sıcaklığı ile ortalama PV elektrik üretimi değişimi (Average PV electricity generation variation with ambient temperature in (a) August and in (b) September)

Şekil 6’da gruplandırılmış çevre sıcaklıklarına karşın PV modüllerin ortalama elektrik üretimi gösterilmektedir. İncelenen her iki durumda, elektrik üretim değerlerinin çevre sıcaklığı ile arttığı görülmektedir. Ağustos ayı (Şekil 6’a) incelendiğinde, 27-28 °C aralığında 90,23 W ortalama güç üretiminin, Eylül ayı (Şekil 6’b) incelendiğinde ise 26-27 °C aralığında 94,96 W güç üretimi olduğu ve bu sıcaklık değerlerinden daha yüksek sıcaklıklarda ortalama güç üretim değerlerinin 100 W’ın üzerinde olduğu, sadece Eylül ayında 36 °C ve üzerinde, düşüşler yaşandığı tespit edilmiştir. Artan sıcaklık değerlerine karşın ortalama güç üretiminin, iniş-çıkışlar sergileyerek dalgalanmasında ve Eylül ayındaki maksimum çevre sıcaklık değerlerine karşılık 100 W’tan daha az elektrik üretimi elde edilmesinde, artan çevre sıcaklığı ve ışınım miktarına bağlı olarak artan panel sıcaklığının ve diğer atmosferik koşullarının etkili olduğu düşünülmektedir.

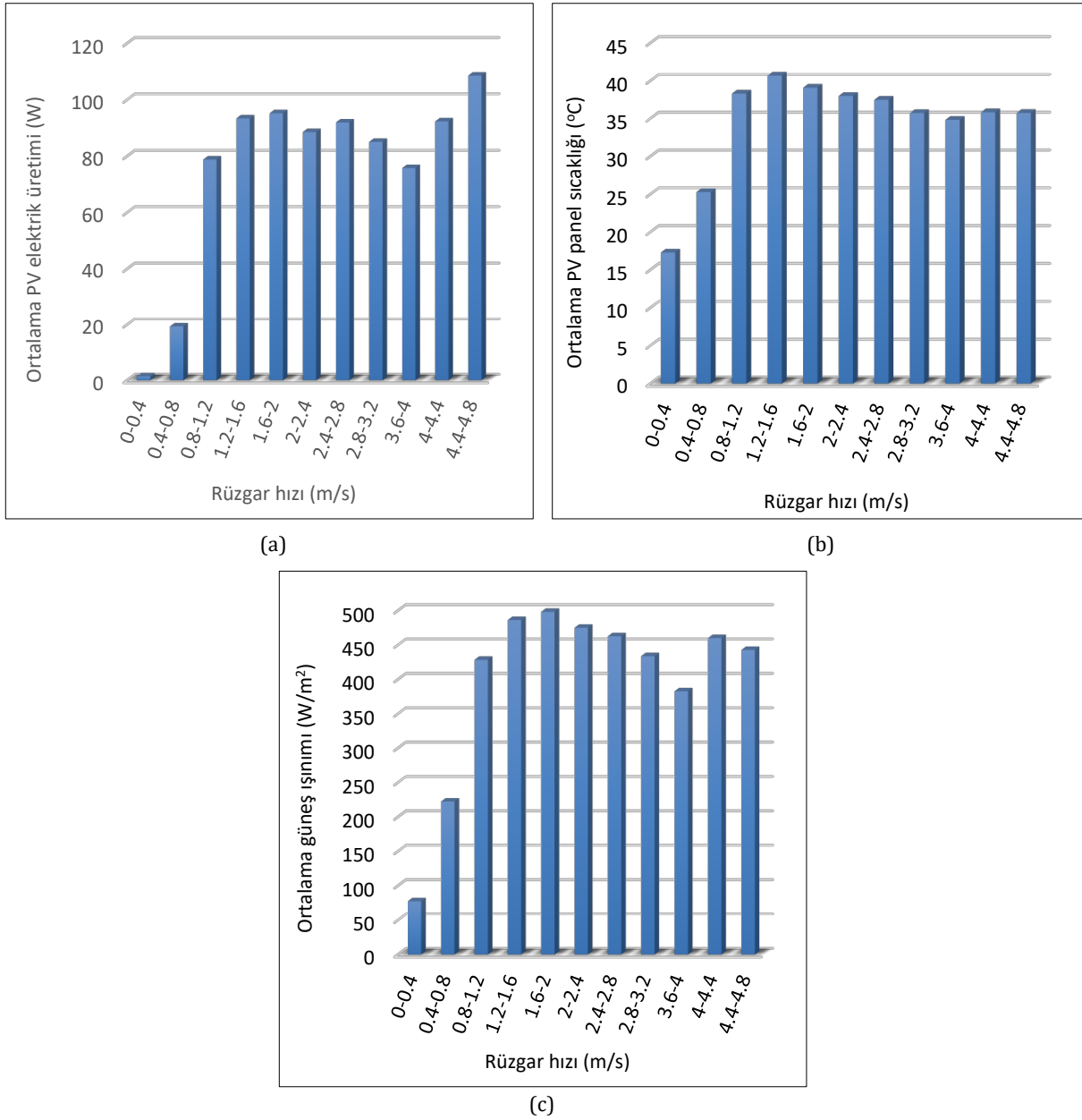
3.3. Rüzgar Hızının PV Modül Güç Üretimine Etkisinin İncelenmesi (Investigation of the Effect of Wind Speed on PV Module Power Generation)

Deneylerde kullanılan polikristal güneş panelinin nominal çalışma sıcaklığı 45±2 °C’ dir. Bilindiği gibi panel sıcaklıklarının, nominal çalışma sıcaklık değerlerinin üzerine çıkması durumunda, elektrik enerjisine dönüştürülecek enerjinin bir kısmı ısı enerjisine dönüşmekte ve oluşan ısı kaybı sonucu PV panellerde verim kaybı yaşanmaktadır. PV panellerde meydana gelen ısı kaybının azaltılmasında rüzgarın verimli olup olmayacağı, rüzgar hızı-PV modül performansları dikkate alınarak incelenmiştir. Bu amaçla 0,4 m/s’lik gruplara ayrılan rüzgar hızı-ortalama PV modül güç üretim grafikleri, Ağustos ayı için Şekil 7’de, Eylül ayı için Şekil 8’de incelenmiştir.



Şekil 7. Ağustos ayı için, (a) ortalama PV elektrik üretiminin, (b) ortalama panel sıcaklığının, (c) ortalama güneş ışınımının rüzgar hızı ile değişimi (Variation of (a) average PV electricity generation, (b) average panel temperature, (c) average solar irradiance with wind speed, for the month of August)

Şekil 7 (a)'da, 1,2 - 2,4 m/s rüzgar hızlarında ortalama güç üretiminin yaklaşık aynı değerlerde ve 100 W üzerine olduğu, 2,4 m/s'den büyük rüzgar hızlarında ise güç üretiminin, düşmeye başladığı tespit edilmiştir. Bu durumda sadece Şekil 7(a) ile rüzgar hızı- PV modül güç üretimi arasındaki bağıntının açıklanamayacağı, bu durumu etkileyen diğer iki önemli husus olan panel sıcaklıkları ve güneş ışınım miktarlarının da dikkate alınması gerektiği ortaya çıkmıştır. Şekil 7'de verilen her üç grafik beraber incelendiğinde, 1,2 - 2,4 m/s rüzgar hızı aralığında, güneş ışınım şiddetlerinin yaklaşık aynı değerlerde olduğu görülebilmektedir. Bu durumda, artan rüzgar hızı ile panel sıcaklıklarının azaldığı Şekil 7(b)'de verilen grafikten görülebilmektedir. Ayrıca, 2,4 m/s'den daha yüksek rüzgar hızlarında ise azalan güneş ışınım miktarına bağlı olarak üretilen enerjinin de azaldığı tespit edilmiştir. Ağustos ayı için nominal rüzgar hızının seçiminde, panel sıcaklığı da dikkate alınmıştır. Buna göre, 1,2 - 2,4 m/s rüzgar hızı aralığında (3 grup) panellerden elde edilen güç değerleri hemen hemen aynı değerlerde olmasına rağmen, 2-2,4 m/s rüzgar hızı grubunda panel sıcaklığı bu 3 grup içindeki en düşük panel sıcaklığına (45,37°C) sahip olması etkili olmuştur. Ayrıca ışınım şiddeti ve üretilen güce göre, artan rüzgar hızlarında kabin sıcaklıklarının düştüğü Şekil 7(c) aracılığı ile görülebilmektedir. Daha net bulgulara ulaşmak ve karşılaştırma yapmak amacı ile Eylül ayında gerçekleşen durumlar da Şekil 8'de incelenerek karşılaştırılma yapılmıştır.



Şekil 8. Eylül ayı için, (a) ortalama PV elektrik üretiminin, (b) ortalama panel sıcaklığının, (c) ortalama güneş ışınımının rüzgar hızı ile değişimi (Variation of (a) average PV electricity generation, (b) average panel temperature, (c) average solar irradiance with wind speed, for the month of September)

Şekil 8 incelendiğinde, Eylül ayı için PV paneller tarafından üretilen elektrik enerjisinin genellikle 80-100 W arasında olduğu, bu değerlerin de 1,2 m/s'den daha yüksek rüzgar hızlarında üretildiği belirlenmiştir. Her üç grafik beraber değerlendirildiğinde, genel olarak ortalama güneş ışınım miktarı ile ortalama üretilen elektrik enerjisi arasında benzerlik olduğu tespit edilmiştir. Yani artan veya azalan güneş ışınım miktarına karşılık panellerde üretilen enerji miktarı bu değişime benzer eğilim göstermektedir. Ayrıca, Şekil 8(b) incelendiğinde, rüzgar hızının artan değerlerinde kabin sıcaklıklarının düştüğü açıkça görülmektedir. Ortalama PV elektrik üretiminin en yüksek değeri 4,4- 4,8 m/s rüzgar hızlarında 108,6 W değeri ile elde edilmiştir. Bu rüzgar hızı aralığında, ortalama güneş ışınım şiddetinin 442,833 W/m², panel sıcaklığının ise 35,74 °C olduğu tespit edilmiştir. Diğer şartlara göre daha az olan güneş ışınım miktarlarında daha fazla elektrik üretimi sağlanması Eylül ayı için nominal rüzgar hızının 4,4 ile 4,8 m/s arasında olması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu durum Ağustos ayı için değerlendirildiğinde, 2,0 – 2,4 m/s rüzgar hızı aralığında, ortalama güneş ışınımının 596,715 W/m², ortalama panel sıcaklığının 45,36 °C ve ortalama elektrik üretiminin 108,10 W değerleri ile nominal rüzgar hızının 2,0 ile 2,4 m/s arasında olması gerektiği sonucunu göstermektedir. Elde edilen bulgulara göre, rüzgar kullanılarak yapılacak panel soğutma işlemlerinde, bölgede sürekli esen rüzgar hızının belirlenen değerler arasında olması durumunda daha fazla verim sağlanacağı tespit edildiğinden bölgede deki rüzgar hızı sayıları da incelenerek Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Ağustos ve Eylül aylarında esen rüzgarların gruplandırılmış hızına göre sayısı (Number of winds blowing in August and September by grouped speed)

		Ağustos										
Rüzgar hızı		0-0,4	0,4-0,8	0,8-1,2	1,2-1,6	1,6-2,0	2,0-2,4	2,4-2,8	2,8-3,2	3,6-4,0	4,0-4,4	4,4-4,8
Rüzgar sayısı		87	182	446	660	461	232	106	53	28	6	2
		Eylül										
Rüzgar hızı		0-0,4	0,4-0,8	0,8-1,2	1,2-1,6	1,6-2,0	2,0-2,4	2,4-2,8	2,8-3,2	3,6-4,0	4,0-4,4	4,4-4,8
Rüzgar sayısı		90	173	346	517	483	337	134	49	39	16	6

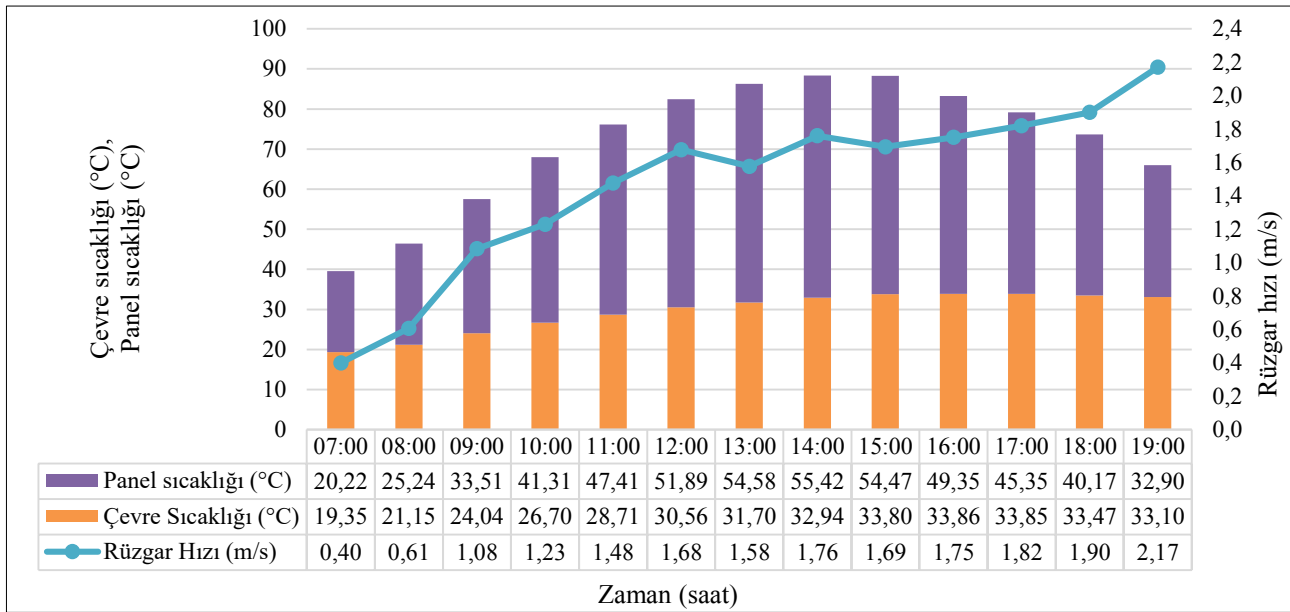
Tablo 2 incelendiğinde, Ağustos ayı için belirlenen nominal rüzgar hızı (2,0 – 2,4 m/s) aralığı için gruplandırılmış rüzgar hızı sayısının 232, Eylül ayı için belirlenen nominal rüzgar hızı (4,4-4,6 m/s) aralığı için gruplandırılmış rüzgar hızı sayısının 6 olduğu görülmektedir. Bu bulgulara göre belirlenen nominal rüzgar hızlarının, bölgede esen tüm rüzgar sayıları içindeki oranı değerlendirildiğinde, Ağustos ayı için yaklaşık %10'na, Eylül ayı için ise yaklaşık %0,26'sına karşılık geldiği tespit edilmiştir. PV panellerde üretilen bu gücün, 2°C aralıklarla gruplandırılmış tüm çevre sıcaklığı ve 0,4 m/s aralıklarla gruplandırılmış tüm rüzgar hızı değerlerine göre ortalama dağılımları Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 3. Rüzgar hızı ve çevre sıcaklığına göre PV panellerde üretilen gücün yüzdelik dağılımı (Percentage distribution of power produced in PV panels according to wind speed and ambient temperature)

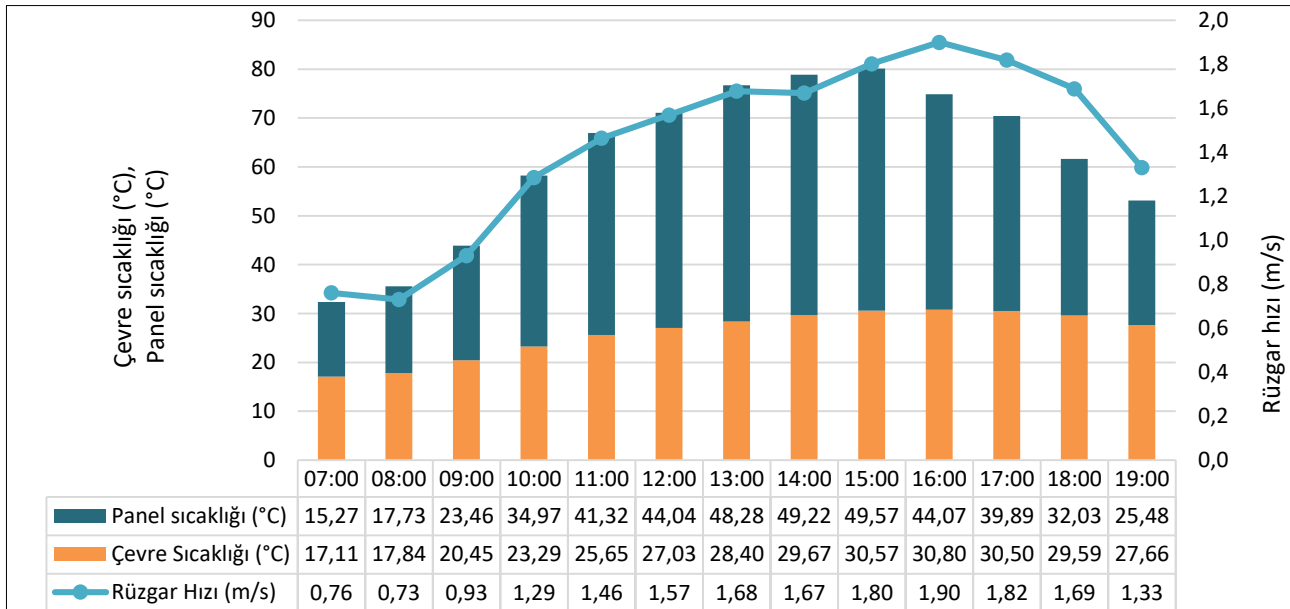
Ağustos						
Rüzgar hızı – Üretilen güç			Çevre sıcaklığı – Üretilen güç			
Rüzgar hızı (m/s)	Ortalama güç (W)	Yüzdesi (%)	Çevre sıcaklığı (°C)	Ortalama güç (W)	Yüzdesi (%)	
0-0,4	1.29	0.21	15.6-17.6	0.27	0.03	
0,4-0,8	13.83	2.20	17.6-19.6	0.83	0.11	
0,8-1,2	70.64	11.25	19.6-21.6	4.31	0.55	
1,2-1,6	109.42	17.43	21.6-23.6	14.42	1.83	
1,6-2	108.31	17.25	23.6-25.6	31.13	3.95	
2-2,4	108.11	17.22	25.6-27.6	75.97	9.63	
2,4-2,8	93.77	14.94	27.6-29.6	112.82	14.31	
2,8-3,2	71.09	11.32	29.6-31.6	110.23	13.98	
3,6-4	33.89	5.40	31.6-33.6	108.45	13.75	
4-4,4	12.74	2.03	33.6-35.6	110.26	13.98	
4,4-4,8	4.63	0.74	35.6-37.6	105.67	13.40	
			37.6-39.6	114.10	14.47	
Eylül						
Rüzgar hızı – Üretilen güç			Çevre sıcaklığı – Üretilen güç			
Rüzgar hızı (m/s)	Ortalama güç (W)	Yüzdesi (%)	Çevre sıcaklığı (°C)	Ortalama güç (W)	Yüzdesi (%)	
0-0,4	1.41	0.17	12.4-14.4	0.30	0.04	
0,4-0,8	19.40	2.34	14.4-16.4	1.57	0.19	
0,8-1,2	78.83	9.49	16.4-18.4	9.26	1.09	
1,2-1,6	93.43	11.25	18.4-20.4	25.64	3.02	
1,6-2	95.24	11.46	20.4-22.4	32.34	3.81	
2-2,4	88.57	10.66	22.4-24.4	53.14	6.27	
2,4-2,8	92.01	11.07	24.4-26.4	79.56	9.38	
2,8-3,2	85.12	10.25	26.4-28.4	101.45	11.96	
3,6-4	75.82	9.13	28.4-30.4	118.39	13.96	
4-4,4	92.37	11.12	30.4-32.4	117.70	13.88	
4,4-4,8	108.60	13.07	32.4-34.4	130.62	15.40	
			34.4-36.4	107.01	12.62	
			36.4-38.4	70.93	8.36	

Tablo 3 incelendiğinde, rüzgar hızı ve çevre sıcaklığına göre sırasıyla Ağustos ve Eylül ayları için nominal rüzgar hızı ve çevre sıcaklığı gruplarının, 2-2,4 m/s ve 37,6-39,6 °C ile 4,4-4,8 m/s ve 32,4-34,4 °C olduğu görülmektedir.

Ayrıca, çevre sıcaklığına ve rüzgar hızına bağlı olarak değişen panel sıcaklığı, elektrik üretimini etkileyen en önemli etkenlerden biri olduğundan, bu unsurun arasındaki etkileşiminin daha net görülebilmesi için ölçüm yapılan toplam süre boyunca kayıt altına alınan verilerin saatlik ortalamaları alınarak incelenen her iki ay için oluşturulan grafikler de Şekil 9 ve 10'da sunulmuştur



Şekil 9. Ağustos ayı için, modellemede kullanılan veriler (For August, the data used in modeling)



Şekil 10. Eylül ayı için, modellemede kullanılan veriler (For September, the data used in modeling)

Şekil 9 ve 10' da deney yapılan her iki ay boyunca ölçülen tüm değerlerin saatlik ortalaması alınarak elde edilmiş grafikler sunulmuştur. Şekil 9 ve 10 beraber incelendiğinde, saatlik ortalama değerleri alınan çevre sıcaklığının ve panel sıcaklığının saat 15.00'e kadar sürekli yükseldiği, bu saatten sonra ise düşüşe geçtiği, rüzgar hızı ortalamasının ise saat 13.00'e kadar sürekli artış gösterdiği görülebilmektedir. Şekil 9'da, Ağustos ayı için belirlenen nominal rüzgar hızı olan 2-2,4 m/s hız grubundaki rüzgarların ortalama olarak saat 19.00'dan sonra oluştuğu, bu durumun PV panellerin güneş ısınımına bağlı olarak en çok elektrik ürettikleri 11.00-15.00 saat aralığının dışında kalması sebebi ile panel soğutulmasında önemli bir etki göstermediği belirlenmiştir. Benzer biçimde Şekil 10 incelendiğinde, Eylül ayı için belirlenen nominal rüzgar hızı grubu olan 4,4-4,8 m/s rüzgar hızlarının, PV panellerin elektrik ürettiği zaman zarfı boyunca mevcut olmadığı görülmektedir.

Şekil 9 ve 10, çevre sıcaklığının panel sıcaklığına olan etkisi bakımından incelendiğinde ise Ağustos ayı için belirlenmiş nominal çevre sıcaklığı değerleri olan 37,6-39,6 °C'nin saatlik ortalaması alınmış çevre sıcaklık değerleri içinde yer almadığı görülmektedir. Aynı durum Şekil 10'da verilen Eylül ayı için belirlenen nominal çevre sıcaklığı olan 32,4-34,4 °C sıcaklık aralığı için de geçerlidir.

4. Sonuçlar (Results)

Edirne iklim şartlarında polikristal paneller ile elektrik üretimi amaçlandığında, elektrik üretim performansı üzerine çevre sıcaklığı ve rüzgar hızının etkilerinin incelendiği bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, incelenen bölgedeki çevre sıcaklığının Ağustos ve Eylül aylarında 26-37 °C aralığında olduğu ve panellerin nominal çalışma sıcaklıkları olan 45±2 °C'nin üzerindeki panel sıcaklıklarında elektrik üretiminin düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, fotovoltaik panellerin performansını etkileyen en önemli atmosferik etkenin güneş ışınımı olduğu, üretilen elektrik enerjisi ile gelen ışınımın doğru orantılı değiştiği tespit edilmiştir. Fotovoltaik panel performansına etkisi incelenen rüzgar hızı için elde edilen bulgulara göre, rüzgar hızının panel sıcaklıklarının düşmesine sebep olduğu, Ağustos ayı için en yüksek elektrik üretiminin ortalama 2,0-2,4 m/s, Eylül ayında ise ortalama 4,4-4,6 m/s rüzgar hızlarında elde edildiği tespit edilmiştir. Elde edilen bu değerlere göre bölgede incelenen zaman aralığındaki gruplandırılmış rüzgar hızı sayıları incelendiğinde, belirlenen nominal rüzgar hızlarının sayısının çok düşük değerlerde olduğu bu sebeple panellerin soğutulmasında rüzgarın direkt soğutucu olarak kullanılmasının yetersiz olacağı, fotovoltaik panellerin soğutulması için yardımcı soğutma sistemlerinin kullanılması durumunda panellerin çıkış gücünün artacağı sonucuna varılmıştır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Adreolli, F., 2015. Yeni Nesil Fotovoltaikler (Cilt Aydın Bodur). (Ç. Özşar, &A. Bodur, Çev.) Ankara: Elektrik Mühendisleri Odası.
- Akyuz, E., Coskun, C., Oktay, Z., Dincer, I., 2012. A novel approach for estimation of photovoltaic exergy efficiency. *Energy*, 44, 1059-1066.
- Aly, P.S., Ahzi, S., Barth, N., 2019. Effect of physical and environmental factors on the performance of a photovoltaic panel. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200 (2019), 109948.
- Atmaca, M., Pekdemir, Z. İ., 2020. PV Panel Sıcaklığı Üzerinde Etkili Olan Atmosferik Parametrelerin Araştırılması. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 32(4), 458-466. DOI:10.7240/jeps.699181.
- Bashir, A.A., Al-Dweri, M., Al-Ghandoor, A., Hammad, B., Al-Kouz, W., 2020. Analysis of Effects of Solar Irradiance, Cell Temperature and Wind Speed on Photovoltaic Systems Performance, *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(1), 353-359. DOI: 10.32479/ijeep.8591.
- Bingöl, O., Özkaya, B. 2019. A Comprehensive Overview of Soft Computing Based MPPT Techniques for Partial Shading Conditions in PV Systems . *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7 (4), 926-939. DOI: 10.21923/jesd.570887
- Chandra, S., Agrawal, S., Chauhan, D.S., 2018. Effect of Ambient Temperature and Wind Speed on Performance Ratio of Polycrystalline Solar Photovoltaic Module: an Experimental Analysis. *International Energy Journal*, 18 (2018), 171–180.
- Durusu, A. , Erduman, A., Yıldız, F. 2020. Comparative Study of Photovoltaic Array Optimum Tilt Angle and Orientation with Multi-Objective Consideration. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8 (4) , 1031-1041. DOI: 10.21923/jesd.745835
- Gedik, E., 2016. Experimental Investigation of Module Temperature Effect on Photovoltaic Panels Efficiency. *Journal of Polytechnic*, 19 (4): 569-576.
- Goossens, D., Goverde, H., Catthoor, F., 2018. Effect of wind on temperature patterns, electrical characteristics, and performance of building-integrated and building-applied inclined photovoltaic modules, *Solar Energy*, 170, 64–75.
- Işıker, Y., Yesilata, B., Bulut, H., 2006. Fotovoltaik Panel Gücüne Etki Eden Çalışma Parametrelerinin Arastırılması ,I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 1, 57-62.
- Lobera, T.D., Valkealahti, S., 2013. Dynamic thermal model of solar PV systems under varying climatic conditions, *Solar Energy*, 93, 183–194.
- Keçebaş, A., Gürel, B., Devlet, B. 2021. Optimize Edilmiş Fotovoltaik Güneş Panellerinin Sabit ve Mobil Uygulamalarda Kullanımının Karşılaştırmalı İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9 (3), 983-991. DOI: 10.21923/jesd.822528.
- Mekhilef, S., Saidur, R., Kamalisarvestani, M., 2012. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2920– 2925.
- Schwingshackl, C., Petittaa, M., Wagnera, J.E., Belluardoc, G., Moserc, D., Castella, M., Zebischa, M., Tetzlaff, A., 2013. Wind effect on PV module temperature: Analysis of different techniques for an accurate estimation. *Energy Procedia*, 40, 77-86.
- Tiano, A.F., Rizzo, G., Marino, M., Monetti, A., 2020. Evaluation of the potential of solar photovoltaic panels installed on vehicle body including temperature effect on efficiency. *eTransportation*, 5(2020), 100067.



ANAEROBİK ÇAMUR ÇÜRÜTÜCÜLERDE FARKLI KATI MADDE ALIKONMA SÜRELERİNDE UÇUCU YAĞ ASİTLERİ VE ALKALİNİTENİN BİYOGAZ ÜRETİM VERİMİNE ETKİLERİ

Serdar KOYUNCU^{1*}, Bilgehan NAS²

¹ Konya Büyükşehir Belediyesi, Konya, Türkiye

² Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Aritma Çamuru,
Alkalinite,
Biyogaz,
SRT,
Uçucu Yağ Asitleri.*

Öz

Yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılacak biyokütleden bir tanesi de atıksu arıtma tesislerinde arıtma sonrası oluşan arıtma çamurlarıdır. Arıtma çamurlarının anaerobik proseslerde çürütülmesi ile biyogaz eldesi mümkün olmaktadır. Atıksu arıtma tesislerinin işletme maliyetlerinin önemli bir kısmını enerji maliyetleri oluşturmaktadır. Anaerobik çamur çürütücülerinde maksimum verimin sağlanabilmesi için prosesin optimum katı madde alıkonma süresi (SRT)'de ve işletme parametre değerlerinde çalıştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada; 200 bin m³/gün kapasiteli olan ve 4 kademeli Bardenpho prosesinden oluşan Konya kentsel atıksu arıtma tesisinde bulunan 4 adet mezofilik anaerobik çamur çürütücülerde gerçek ölçekli bir araştırma yapılmıştır. Ortalama işletme sıcaklığı ve hacimleri aynı olan referans ve denek çürütücüler seçilmiştir. Referans çürütücüde, tasarım değeri olan SRT 20 gün olacak şekilde 240 gün boyunca, denek çürütücülerde ise SRT 17 ve 23 gün olacak şekilde 120'şer gün boyunca gerçek ölçekli proses işletilmiştir. Anaerobik çamur çürütücülerin işletme parametrelerinden olan Uçucu Yağ Asitleri (UYA) ve Alkalinite değerlerinin farklı SRT'lerde biyogaz üretimine olan etkileri araştırılmıştır. SRT 17, 20 ve 23 gün için sırasıyla %86, %83, %87 UYA giderimi gerçekleşmiştir. En fazla biyogaz üretimi SRT 17 gün senaryosunda ortalama 4,756 m³/gün olarak gerçekleşmiştir.

EFFECTS OF VOLATILE ACIDS AND ALKALINITY IN DIFFERENT SOLID RETENTION TIMES OF ANAEROBIC SLUDGE DIGESTER ON BIOGAS PRODUCTION YIELD

Keywords

*Treated Sludge,
Alkalinity,
Biogas,
SRT,
Volatile Fat Acids.*

Abstract

There is an increasing interest on the use of renewable energy sources to supply an important amount of the energy demand within the WWTP. The sludge produced in the wastewater treatment plants is one of the renewable energy sources as biomass. It is possible to produce biogas after the digestion of sludge by means of anaerobic processes. An important part of the operational costs of the waste water treatment plants (WWTP) is the energy cost. In order to achieve maximum efficiency, the process must operate in optimum solid retention time (SRT), other operational parameter values. In this study, a real scale research has been done in Konya urban wastewater treatment plant of 200.000 m³/day capacity consisting of 4 stage Bardenpho process with 4 mesophilic anaerobic sludge digestors. Same average operational temperature and volume values are chosen for reference and experimental digestors. The reference digester with the design values of 20 days SRT operated for 240 days and the experimental digester with SRT 17 and SRT 23 operated 120 days on real scale process. The effects of the Volatile Fat Acids (VFA) and alkalinity on different SRT values are researched during the production of biogas. For SRT 17, 20 and 23 days, 86%, 83% and 87% VFA removal was achieved, respectively. The highest biogas production was realized as 4,756 m³/day in the SRT 17 day scenario.

* İlgili yazar / Corresponding author: serdar.koyuncu@konya.bel.tr, +90-332-221 6115

Alıntı / Cite

Koyuncu, S., Nas, B., (2022). Anaerobik Çamur Çürütücülerde Farklı Katı Madde Alıkonma Sürelerinde Uçucu Yağ Asitleri ve Alkalinitenin Biyogaz Üretim Verimine Etkileri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 103-109.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Koyuncu, 0000-0002-4757-4680
B. Nas, 0000-0002-2942-8225

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	27.04.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	21.09.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	22.09.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Enerji kaynaklarının yoğun bir şekilde tüketilmesinin nedenlerinden biri de günümüz koşullarında hayat standartlarının artması ve teknolojinin gelişmesidir. Dünyanın enerji ihtiyacının her geçen gün artması sonucu yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmaya başlamıştır. Atıksu arıtma tesisleri (AAT)'nde arıtma sonrası oluşan arıtma çamurları da yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılacak biyokütleden bir tanesidir. Organik yükü fazla olan arıtma çamurlarının anaerobik proseslerde çürütülmesi ile yüksek biyogaz verimi elde edilmektedir (Koyuncu, 2014).

Farklı organik maddelerin işlenmesi için etkili bir yöntem olarak anaerobik arıtma köklü bir teknoloji olarak gösterilmektedir (Pöschl vd., 2010).

Yüksek organik yüklemelerde de anaerobik sistemler çalıştırılabilmektedir (Rittman ve McCarty, 2001). Organik ve inorganik maddelerin oksijensiz ortamlarda yokluğunda mikroorganizmaların yardımıyla parçalanarak karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), hidrojen sülfür (H₂S) ve amonyak (NH₃) gibi nihai ürünlere dönüşmesi anaerobik arıtma prosesi olarak tanımlanır. Atıksu arıtma tesislerinde ortaya çıkan ham (birincil) çamur ve biyolojik fazla çamurlar anaerobik (oksijensiz) ortamda çürütülürler. Anaerobik bakteriler tarafından anaerobik çamur çürütme prosesi gerçekleştirilir. Organik çamurların oksijensiz ayrışma süreci başlıca üç safhada gerçekleşir. Bu safhalar; hidroliz, asit üretimi ve metan üretimidir (Öztürk, 1999). Aktif çamur içerisindeki birçok organik bileşik partiküler formda bulunmakta olup, yavaş bir süreç olan hidroliz işlemiyle ayrışmaktadır (Aydın ve Civelekoğlu, 2010). Anaerobik çamur çürütücülerde üretilen biyogaz verimini etkileyen çok sayıda işletme parametresi bulunmaktadır. Çalışmaların lab veya pilot ölçekte yapılması ile gerçek ölçekte yapılması arasında önemli verim farklılıkları da gözlenebilmektedir. Konya AAT'de anaerobik çürütücülerin dizaynı SRT değeri 20 gün alınarak yapılmıştır. Tesisler işletmeye alındığında tasarımda ön görülen atıksu karakterizasyonunun da önemli değişiklikler olduğundan atıksu arıtma tesisleri mevcut işletme verilerine göre adapte edilebilmelidir. Bu çalışmada da dizayn değeri olarak SRT 20 gün alınan Konya AAT anaerobik çürütücülerini farklı SRT değerlerinde işletmiş ve srt değerinin işletme verimine etkileri gerçek ölçekte araştırılmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Anaerobik çamur çürütücülerin işletilmesi ve işletme parametrelerinin verim üzerine etkilerine ilişkin çok sayıda laboratuvar ve pilot ölçekli araştırma yapılmıştır.

Anaerobik çürütme prosesinin optimum işletilmesinde etkili olan çevresel faktörlerden bazıları, uçucu organik katı madde (UKM), organik yükleme hızı (OLR), uçucu yağ asitleri (UYA), Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), Toplam Organik Karbon (TOK), alkalinite, UYA/alkalinite, pH, katı madde alıkonma süresi (SRT), sıcaklık, biyogaz miktarı ve metan (CH₄) oranıdır. Prosesin maksimum verimde çalışması için sistemi etkileyen parametrelerin sürekli izlenmesi ve kontrol altında tutulması gerekmektedir. Speece (1996) tarafından yapılan bir çalışmada, genel olarak anaerobik arıtmada oluşan metanın %28'i CO₂ ve H₂'den, %72'si ise asetik asitten üretildiği belirtilmiştir. Hidrojen kullanan metanojenler tarafından gerçekleştirilen metanojenik solunum CO₂'den CH₄ oluşumu gerçekleşir (Alvarez, 2003). Anaerobik süreçte yer alan tamponlayıcı bileşikler, bikarbonat, hidrojen sülfür, fosfat ve amonyaktır (Anderson ve Yang, 1992). Karlsson vd. (2012) yaptıkları bir çalışmada; eser elementlerin çürütücüye ilavesi ile uçucu yağ asitlerin bozunma veriminin arttığını ve prosesin performansını iyileştirerek daha yüksek biyogaz üretildiğini belirtmişlerdir.

Ekonomik bir değeri olan ve prosesin verimini belirleyen bir parametre olan biyogaz anaerobik arıtımın en önemli nihai ürünüdür. Üretilen biyogazın bir dizi arıtım ünitelerinden (köpük tutucu, çakıl filtre, desülfürizasyon vb.) sonra gaz motorları vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir (Koyuncu, 2014). Biyolojik arıtma sistemlerinde arıtma çamurlarının arıtımı ve bertaraf edilmesinin maliyeti, toplam atıksu arıtma maliyetinin yaklaşık %35-40'ını oluşturmaktadır (Yasui ve Shiba, 1994). AAT'lerin işletme giderlerinin en büyük payını enerji giderleri oluşturmaktadır. Arıtma çamurlarının anaerobik çürütülmesi ile elde edilen biyogazın elektrik enerjisine

çevrilerek tesisin enerji ihtiyacının önemli bir kısmı karşılanabilmektedir. Erdem vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada; atıksu arıtma tesislerinde ısıtma ihtiyacından kaynaklanan ısının anaerobik çürütme tanklarından çıkan biyogazın kullanılması ile işletme giderlerinin %80' i azalacağı ön görülmüştür. Türkiye'de 33 adet kentsel atıksu arıtma tesisinde çamur stabilizasyonu anaerobik çamur çürütücüler ile yapılmaktadır (TÜRAAAT, 2016). Geri dönüşüm yoluyla optimum enerji üretiminin sağlanması, tesisin yapım ve işletme maliyetlerinin azaltılması için tasarım kriterlerinin mevcut işletme verilerine uygunluğunun bilimsel olarak ortaya konulması gerekmektedir (Koyuncu, 2014). Yüksek miktarlarda biyogaz üretimi ve biyogaz içerisindeki metan muhtevasının da fazla olması anaerobik arıtma proseslerinde gerçekleşmesi istenen bir durumdur. Biyogaz içerisindeki metan oranının düşmesinin başlıca nedenlerinden biri de metan bakterilerinin çalışmasına etki eden bir unsurun oluşmasıdır (Metcalf ve Eddy, 2003). Teorik olarak 1 kg KOİ'nin giderilmesi ile 0.38 m³ CH₄ üretilebilir. Biyogazın ısı değeri 21,000-25,000 kJ/m³, yoğunluğu ise havanınkinin %86'sıdır. Biyogaz üretilen anaerobik proseslerde; %75 CH₄ içeren 1 m³ gaz, 1.4 kWh elektrik enerjisine eşdeğerdir (Arceivala, 2002). Türkiye'nin biyokütle atık potansiyelinin yaklaşık 8,6 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) ve üretilebilecek biyogaz miktarının ise 1,5-2 MTEP olduğu tahmin edilmektedir (Gürel, 2020).

Bu çalışmada; Konya kentinin kentsel atıksularının arıtıldığı ileri biyolojik AAT'deki 20 gün SRT değerine göre projelendirilen ve inşa edilen mevcut anaerobik çamur çürütücülerin farklı SRT' lerde (17 gün, 20 gün ve 23 gün) işletmesi durumunda biyogaz verimi araştırılmıştır. Bu amaçla, 240 gün boyunca Konya AAT ham atıksuyunda, debi, AKM, KOİ, BOİ, TOK, TN, TP ve pH, çürütücülere beslenen çamurda ve çürütülmüş çamurda, çamur debisi, organik yükleme hızı (OLR), TKM, UKM, KOİ, TOK, TKN, Alkalinite, UYA, Protein, pH ve sıcaklık, üretilen biyogazda ise biyogaz debisi, metan, CO₂ ve sülfür konsantrasyonları ölçülmüştür. Tüm bu çevresel işletme parametrelerinin optimum biyogaz üretimine etkisi araştırılmış olmakla birlikte, bu bildiri kapsamında önemli işletme parametrelerinden olan UYA ve Alkalinite parametrelerinin biyogaz üretimine etkileri tartışılmıştır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu makalede, 2010 yılında işletmeye alınan ve 200,000 m³/gün kapasiteli Konya kentsel ileri biyolojik AAT'de arıtma çamurlarının stabilizasyonu için tasarlanan ve inşaatı yapılan 4 adet her biri 7000 m³ hacimli anaerobik çamur çürütücünün tasarım ve işletme verileri detaylı olarak incelenmiştir. Tesisin tasarımında anaerobik çürütücüler 20 gün SRT olarak tasarlanmıştır. Tesiste oluşan çamurlardan daha yüksek oranda biyogaz üretilebilmesi için anaerobik çürütücülerin farklı SRT değerlerinde işletilmesi, atıksu karakterizasyonu ve çeşitli işletme parametrelerinin biyogaz verimine etkisi araştırılmıştır.

Bu amaçla; tesiste bulunan çürütücülerden 3 adeti tasarım değeri olan SRT 20 gün de işletilirken bu reaktörlerden biri referans reaktör olarak izlenmiştir. Diğer 1 reaktör ise denek reaktör olarak SRT 17 gün ve SRT 23 gün olmak üzere 120'şer gün işletilmiştir. Anaerobik çürütücülere beslenen arıtma çamurunun UYA ve Alkalinite değerleri ile çürütücü çıkışındaki UYA ve Alkalinite değerleri izlenerek farklı SRT'lerde üretilen biyogaz verimine etkileri 8 ay süresince araştırılmıştır (Koyuncu, 2014).

Anaerobik çürütücülerde işletme şartlarının biyogaz verimine etkilerinin izlenmesi amacıyla 3 kez/hafta sıklığında izlenen pH, UYA, Alkalinite, sıcaklık, biyogaz debisi ve metan parametrelerin ölçüm ve analizleri için kullanılan cihazlar ile deneysel metotları Tablo 1'de özetlenmiştir.

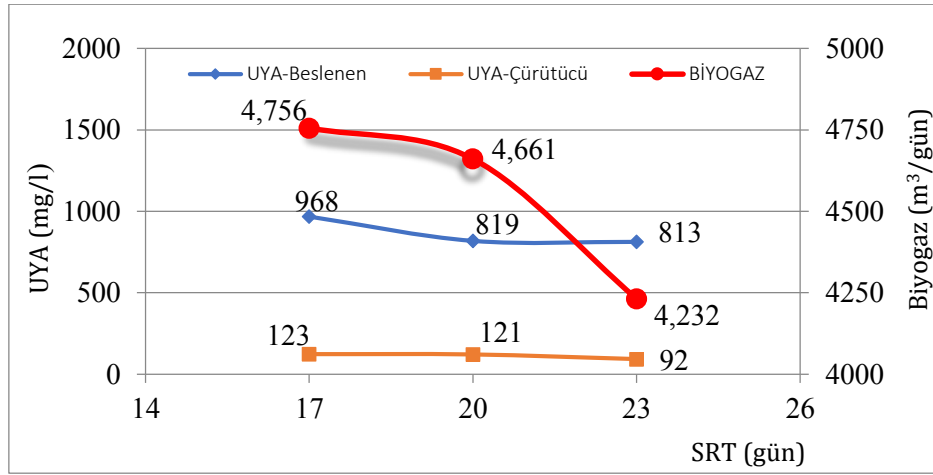
Tablo 1. İzlenen Parametrelerin Analiz Metotları ve Kullanılan Cihazlar (Koyuncu 2014) (Analysis Methods of Monitored Parameters and Equipments Used).

Parametre	Metod	Cihaz
pH	Elektrometrik Metod SM 4500 H ⁺ B	pH Metre Hach Sension
UYA	Kapiler Titrimetrik Metod	
Alkalinite	Titrimetrik Metodu SM 2320 B	
Sıcaklık (°C)	Laboratuar Metodu SM 2550 B	pH Metre Hach Sension
Biyogaz Debisi	Kütleli Debimetre	Kütleli Ölçüm - Drager
Metan (CH ₄)	Kütleli Debimetre	Kütleli Ölçüm Drager

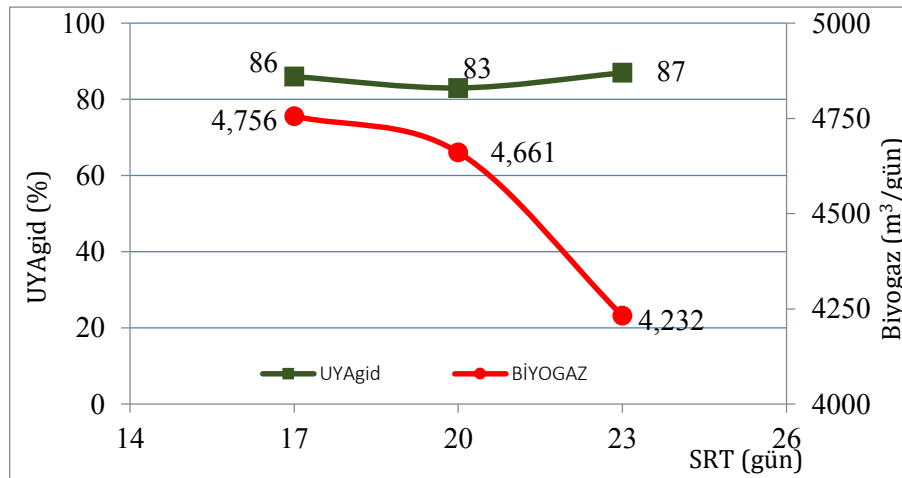
4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Çalışma kapsamında; referans reaktör SRT 20 gün olacak şekilde 240 gün, denek reaktörler ise SRT 17 ve 23 gün değerlerinde 120'şer gün çalıştırılmıştır. 8 ay süreyle yapılan gerçek ölçekte reaktörlerde yürütülen deneysel araştırmalarda tesise ulaşan ham atıksu karakterizasyonunda önemli bir değişiklik olmamıştır. Anaerobik çürütücüler 120'şer günlük ve 240 günlük denemelerde ortalama 38 °C'de çalıştırılmış ve bu işletme süresince gün içinde +/- 2 °C'nin altında sıcaklık salınımı olduğu görülmüştür (Koyuncu, 2014). Çalışma süresince beslenen çamurda ve çürütücü çıkışındaki çamurda UYA, alkalinite ve üretilen biyogaz miktarının ölçümleri 3 kez/hafta olmak üzere yapılarak verilerin aritmetik ortalamaları alınmak suretiyle proseste üretilen biyogaz verimine etkileri değerlendirilmiştir.

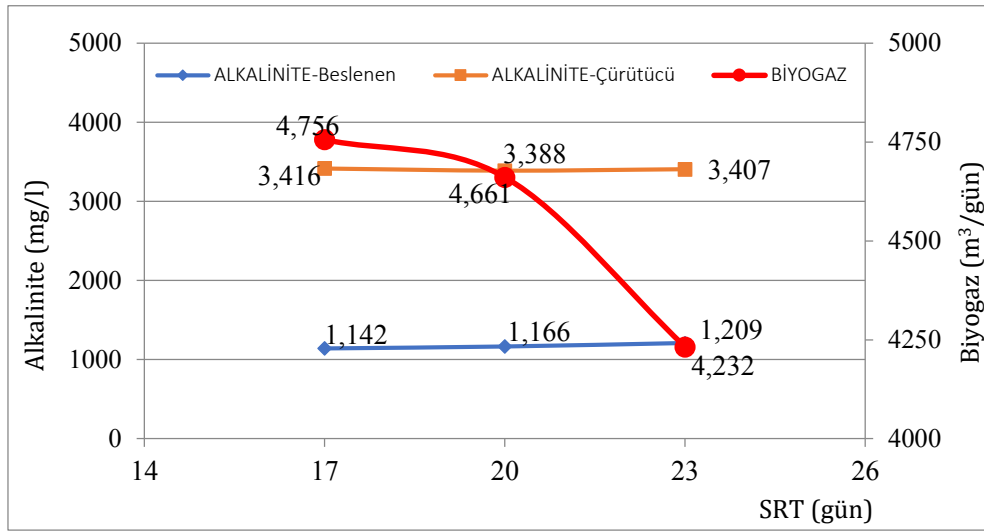
Buna göre; farklı SRT'lerdeki anaerobik çürütücüye beslenen ve çürütücü çıkışındaki çamurda UYA'nın değişimi ve üretilen biyogaz miktarları Şekil 1'de verilmiştir. Araştırmanın yapıldığı 240 gün boyunca anaerobik çürütücüye beslenen çamurların UYA değerleri zamanla değişim gösterebildiğinden 3 kez/hafta olmak üzere ölçülen UYA değerlerinin ortalaması alınmış ve 17 gün SRT de işletilen denek reaktöre beslenen UYA değerinin ortalaması 968 mg/L, 20 gün SRT de işletilen referans çürütücüde 819 mg/L ve son olarak 23 gün SRT de işletilen denek çürütücüde 813 mg/L UYA değerleri tespit edilmiştir. Bu besleme değerlerinde reaktörlerden çıkan çamurda ölçülen UYA değerleri ise 17, 20 ve 23 gün SRT değerleri için sırası ile 123 mg/L, 121 mg/L ve 92 mg/L olarak belirlenmiştir. Şekil 2'de farklı SRT'lerde (17 gün, 20 gün ve 23 gün) UYA'nın giderim verimleri sırasıyla %86, %83 ve %87 olarak gerçekleşmiştir. %86 oranında UYA gideriminin elde edildiği SRT 17 gün işletme şartlarında en yüksek biyogaz üretilmiştir.



Şekil 1. Farklı SRT Değerlerinde Çürütücülerde UYA ve Biyogaz Üretiminin Değişimi (Variation of VFA and Biogas Production in Digesters at Different SRT Values)



Şekil 2. SRT Parametresi ile Çürütücülerde UYA Gideriminin Değişimi (Variation of VFA Removal in Digesters by SRT Parameter)

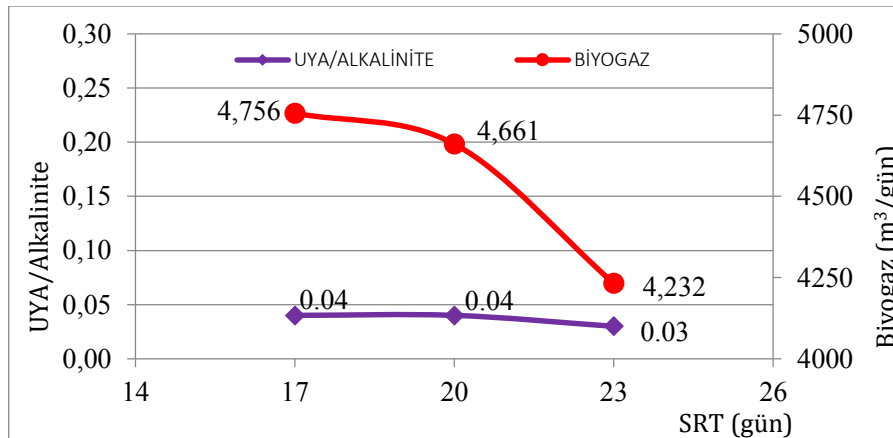


Şekil 3. SRT Parametresi ile Alkalinite ve Biyogaz Üretiminin Değişimi (Variation of Alkalinity and Biogas Production with SRT Parameter)

Anaerobik çürütücülerde besleme çamurundaki UYA; 1,000-1,500 mg/l'ye kadar değişebilir (Öztürk, 2007). UYA konsantrasyonunun 2,200 mg/l olduğu şartlarda organik yükün azaltılması gerektiği belirtilmiştir (Schober ve ark., 1999). Mezofilik anaerobik çürütücülerde $50 < \text{UYA} < 300$ mg/l olması çürüme prosesinin iyi işlediğini gösterir (Metcalf ve Eddy, 2003). Beslenen çamurun UYA miktarı, giriş atıksu karakterizasyonuna bağlı olarak farklılık göstermektedir. Sistemde metan bakterileri tarafından UYA'nın tüketilmesi sonucunda çürütücü çıkışında çamurun UYA'sı azalmaktadır. Polonya'da evsel katı atıkların organik fraksiyonları ile arıtma çamurlarının ortak stabilizasyonunda CH_4 oluşma kinetiğinin araştırıldığı bir çalışmada; SRT'nin artması ile üretilen biyogazda artış, UYA'da ise azalma olduğu görülmüştür (Sosnowski vd., 2008). Aşırı uçucu yağ birikimi yüksek organik yüklerin neden olduğu asitler (VFA), anaerobik sindirimi yoğun bir şekilde engeller (Xu vd., 2014). Bu çalışmada da çürümüş çamurdaki UYA değerleri SRT'nin yükseltilmesi ile birlikte azalmıştır.

Araştırma süresince; referans çürütücüde (SRT= 20 gün) yapılan 240 günlük izleme süresince üretilen toplam biyogaz 1,118,526 m³/gün olup, ortalama 4,661 m³/gün biyogaz üretimi elde edilmiştir. Birinci denek çürütücüde (SRT = 17 gün) yapılan 120 günlük izleme süresince üretilen toplam biyogaz 570,734 m³/gün olup, ortalama 4,756 m³/gün biyogaz üretimi elde edilmiştir. İkinci denek çürütücüde (SRT = 23 gün) yapılan 120 günlük izleme süresince üretilen toplam biyogaz 507,857 m³/gün olup, ortalama 4,232 m³/gün biyogaz üretimi elde edilmiştir. Atıksu arıtma tesisinin tasarımında anaerobik çürütücüler SRT 20 gün olarak tasarlanan tesisin bu çalışmada neticesinde; tasarımın aksine SRT 17 gün'de en yüksek miktarda biyogazın elde edilebileceği görülmüştür.

Çalışma süresince biyogaz verimini önemli ölçüde etkileyen UYA ile birlikte alkalinite değerinin etkisi de incelenmiştir. Buna göre; farklı SRT'lerdeki alkalinitenin değişimi ve biyogaz üretim değerleri Şekil 3'de verilmiştir. İşletme süresince 240 günde beslenen çamurda ve çürütülmüş çamurda alkalinite değerleri ham atıksu karakterizasyonuna bağlı olarak değişkendir. Beslenen çamurdaki alkalinite değerlerinin ortalaması 17, 20 ve 23 gün SRT işletme değerlerinde 1,142 mg/L, 1,166 mg/L ve 1,209 mg/L olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4. SRT Parametresi ile Çürütücülerde UYA/Alkalinite Oranının Değişimi (Variation of VFA/Alkalinity Ratio in Digesters by SRT Parameter)

Çürütülmüş çamurdaki alkalinite değerleri ise sırasıyla 3,416 mg/L, 3,388 mg/L ve 3,407 mg/L olarak gerçekleşmiştir. Biyogaz verimini etkileyen ve işletmede kontrol altında tutulması gereken parametrelerden olan UYA/Alkalinite ortalama değerleri ise 17, 20 ve 23 gün SRT işletme değerlerinde sırasıyla 0.04, 0.04 ve 0.03 olarak gerçekleşmiştir. UYA/Alkalinite değişimleri Şekil 4'de verilmiştir. Besleme çamurundaki alkalinite; 1,000-4,000 mg/l ve çürümüş çamurda ise 2,500-4,000 mg/l aralıklarında seyredebilir (Öztürk vd., 2005). McGraw-Hill, (2010)'a göre ise tipik mezofilik anaerobik çürütücülerde alkalinite 2,500-5,000 mg/L CaCO₃ değerleri arasında gerçekleşmelidir. Biyogaz içerisindeki CO₂ miktarının artışı veya alkalinite değerindeki düşme, pH'ın düşmeye başlamadan önce sistemin bozulduğunu gösterir (Klein, 2002).

Anaerobik çamur çürütücülerin işletilmesinde dikkate alınacak en önemli parametrelerden biri olan UYA/Alkalinite değerinin 0.1'den küçük olması çürüme işleminin iyi olduğunu gösterir (Öztürk, 2007). Metcalf ve Eddy (2003)'e göre ise UYA/Alkalinite oranı <0.3 mg UYA / mg/L CaCO₃ değerleri arasında gerçekleşmelidir. Çalışmamızda, farklı SRT'lerde UYA/Alkalinite oranının ortalama değerlerinin 0.04 ve 0.03 olarak gerçekleştiği yüksek verimle işletme yapıldığı tespit edilmiştir.

Tesisin incelendiği dönemdeki AAT'ye bağlı eşdeğer nüfus göz önüne alınarak kişi başına biyogaz oluşumu hesaplandığında SRT 17 gün de işletme yapılması durumunda yaklaşık 19 L biyogaz /kişi.gün değeri elde edilmiştir. VSA (2010) da bu değer 18-26 L/kişi.gün aralığında olabileceği verilmektedir. Oluşan biyogazın CH₄ içeriği ise %63-67 aralığında olabilmektedir. İnceleme süresinde SRT 20 gün olan referans çürütücüde %61-72 aralığında olmak üzere ortalama %68 CH₄ içeriği belirlenmiştir. SRT 17 gün de ise %62-70 aralığında olmak üzere ortalama %67 CH₄ içeriği gözlenirken, 23 gün SRT de %68-71 olmak üzere ortalama %69 CH₄ içeriği tespit edilmiştir (Koyuncu, 2014).

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Konya AAT ülkemizdeki mevcut AAT'lerden anaerobik çamur çürütücüye sahip büyük ölçekli AAT'lerinden biridir. 2010 yılında işletmeye alınan tesiste anaerobik çürütücüler ise her biri 7000 m³ hacminde olan 4 çürütücüden oluşmaktadır. Tesiste ön çökeltme ve fazla biyolojik çamurlar graviteli yoğunlaştırıcı sonrası 20 gün SRT de tasarlanan ve işletilen çürütücülerde stabil hale getirilmektedir. Tasarım değeri olan 20 gün SRT ile işletilen çürütücülerden optimum işletme şartlarının belirlenmesi ve daha fazla biyogaz elde edilebilmesi amacıyla optimum SRT değeri araştırılmıştır.

Bu kapsamda; yapılan araştırmalarda çok sayıda çevresel işletme parametrelerinin 240 gün süresince etkisi incelenmiş olmakla birlikte bu bildiri kapsamında çamurdaki UYA ve alkalinite değerlerinin, SRT değişimi ile birlikte biyogaz oluşuma etkisi tartışılmıştır. Tasarım değeri olan 20 gün yerine 17 gün SRT de çürütücülerin işletilmesi durumunda daha fazla biyogaz üretildiği belirlenmiştir. 17 gün SRT işletme sürecinde 19 L biyogaz /kişi.gün değeri elde edilmiştir ve üretilen biyogazın CH₄ içeriği ortalama %67 olarak tespit edilmiştir (Koyuncu, 2014). En az UYA giderimi SRT 20 gün işletme şartlarında çalıştırılan referans reaktörde gerçekleşmiştir. En yüksek biyogazın elde edildiği SRT 17 gün denek reaktöründe ise ortalama %86 oranında UYA giderimi gerçekleşmiştir.

Anaerobik proseslerde UYA'nın Alkaliniteyi tüketmesinden dolayı iki parametrenin dengede olması gerekmektedir. Bu çalışmada işletme süresince her iki parametrenin ve pH değerlerinin sürekli kontrol altında tutulduğundan dolayı sistemin inhibe olması engellenmiştir. Besleme çamurunda ve çürümüş çamurdaki alkalinite değerleri anaerobik çamur arıtımında genel biyolojik arıtma prensibi olarak istenilen değerlerde kaldığı görülmüştür. Referans ve denek çürütücülerde işletme süresince UYA/Alkalinite değerleri istenilen işletme değerlerinde olduğu belirlenmiştir. SRT 17-20-23 gün işletme değerleri için UYA/Alkalinite sırasıyla 0.04-0.04 ve 0.03 değerlerinde olduğu izlenmiştir. Metcalf ve Eddy (2003)'e göre ise UYA/Alkalinite oranı <0.3 mg UYA / mg/L CaCO₃ değerleri arasında gerçekleşmelidir. Bu çalışmada referans ve denek çürütücülerdeki UYA/Alkalinite değerleri literatür verileri içerisinde kalmıştır. Ülkemizde anaerobik çamur çürütücü prosesi olan atıksu arıtma tesisleri mevcut işletme verilerini değerlendirerek anaerobik çürütücülerini optimum verimde işletebilmek için işletme şartlarının biyogaz verimine etkilerini araştırmalıdır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde her türlü desteği sağlayan Konya Su ve Kanalizasyon İdaresi (KOSKİ) Genel Müdürlüğü'ne 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)

- Alvarez, M.J., 2003. Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes, *Iwa Publishing*, U.K.
- Anderson, G. H. and Yang, G., 1992. Determination of bicarbonate and total volatile acid concentration in anaerobic digesters using a simple titration, *Water Environment Research*, 64 (1), 53-59.
- Arceivala, S.J., 2002. Wastewater Treatment for Pollution Control, Balman V., Balman, A.H., New Delhi. Design of Municipal Wastewater Treatment Plants, 5th ed. New York: McGraw-Hill Education.
- Aydın, B., Civelekoğlu, G., 2010, Ultrasonik Arıtmanın Atık Aktif Çamur Üzerine Etkileri, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 1(1), 28-32.
- Erdem, İÇ., Doğan, Ö., Kurt, ES., 2019. Tam Ölçekli İki Aşamalı Kısmi Nitrifikasyon-Anammox Ünitesi İçin Maliyet Belirleme Çalışması, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(3), 671-679.
- Gürel, B., 2020. Türkiye'deki Güncel Biyokütle Potansiyelinin Belirlenmesi ve Yakılmasıyla Enerji Üretimi İyi Bir Alternatif Olan Biyokütle Atıklar İçin Sektörel Açından ve Toplam Yanma Enerji Değerlerinin Hesaplanması, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 407-416.
- Karlsson, A., Einarsson, P., Schnürer, A., Sundberg, C., Eilertsson, J., Svensson, B.H., 2012. Impact of trace element addition on degradation efficiency of volatile fatty acids, oleic acid and phenyl acetate and on microbial populations in a biogas digester, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 114(4), 446-452.
- Klein, J., 2002. Anaerobic wastewater treatment-the anaerobic digestion of lipids, *Tampere University of Technology, Department of Environmental Engineering*.
- Koyuncu, S., 2014 . "Konya Atıksu Arıtma Tesisi Anaerobik Çamur Çürütücülerinde Optimum Biyogaz Verimi için İşletme Şartlarının ve Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi" Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Konya, 180 s.
- Metcalf ve Eddy, 2003. Wastewater Engineering Treatment and Reuse, McGraw-Hill inc, New York.
- Öztürk, İ., 2007. Anaerobik Arıtma ve Uygulamaları, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.
- Öztürk, İ., Timur, H. ve Koşkan, U., 2005 Atıksu arıtımının esasları, *T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı*, Ankara.
- Pöschl, M., Ward, S., and Owende, P., 2010. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways, *Applied Energy*, volume 87, Issue 11, November, Pages 3305-3321.
- Rittmann, B.E. and McCarty, P.L., 2001. Environmental biotechnology principles and applications, *McGraw-Hill inc. New York*.
- Schober, G., Schafer, J., Schmid, U. and Trosch, U., 1999. One and two-stage digestion of solid organic waste. *Water Research*, 33, 854-860.
- Sosnowski, P., Smolka, K.A., Kaczorek, K. and Ledakowicz, S., 2008 Kinetic investigations of methane co-fermentation of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes, *Bioresource Technology*, 99, 5731-5737.
- Speece, R.E., 1996. Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters, *Archae Press*.
- TÜRAAT, 2016. Ülke Genelindeki Evsel/Kentsel Atıksu Arıtma Tesislerinin Mevcut Durumunun Tespiti, Revizyon İhtiyacının Belirlenmesi Projesi, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Final Raporu, Koordinatör: Prof.Dr. Bilgehan NAS.
- VSA - Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutz-Fachleute, 2008/2010. Energie in ARA, Leitfaden zur Energieoptimierung auf Abwasserreinigungsanlagen. Handbuch im Auftrag des Bundesamtes für Energie und des VSA, Schweiz.
- Xu, Z., Zhao, M., Miao, H., Huang, Z., Gao, S., Ruan, W., 2014. In situ volatile fatty acids influence biogas generation from kitchen wastes by anaerobic digestion, *Bioresource Technology*, 163, 186-192.
- Yasui, H. and Shiba, M., 1994. An innovative approach to reduce excess sludge production in the activated sludge process, *Water Science and Technology*, 30 (9), 11-20.



MARMARA BÖLGESİ P DALGA HIZI DEĞİŞİMİ VE KABUK KALINLIĞININ BELİRLENMESİ

İbrahim Hakan DEMİRSİKAN*, Şakir ŞAHİN, Erdinç ÖKSÜM

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*P Dalga Hızı,
Sismik Tomografi,
Sismik Hız,
Marmara Bölgesi,
Kabuk Yapısı.*

Öz

Bu çalışmada Marmara bölgesi ve Marmara denizi altındaki kabuk yapısının üç boyutlu P- dalgası tomografi görüntülerini belirledik. Bu işlem yapılırken Poisson Oranı Tomografi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle cisim dalgalarının varış zamanlarının parametrelerini hesaplanmıştır. Çalışma alanında 2007-2019 yılları arasında meydana gelen 121574 adet depremin P- dalgası varış zamanları bölgenin üç boyutlu hız yapısını belirlemek için kullanılmıştır. Başlangıç hız modeli olarak bir çok model ile dama tahtası çözünürlük testi uygulanmış en yüksek çözünürlüğü aldığımız hız modeli ile tomografi yöntemi yapılmıştır. Elde ettiğimiz sonuçlardan, Marmara'nın orta kesiminde hızların düştüğü saptanmıştır. Genel olarak hızların derinliği yaklaşık olarak 15 km'den itibaren Sismik hızlar düşüş göstermektedir. Diğer çalışmalardan farklı olarak Kuzey Anadolu Fay Zonunun kolları üzerinde hangi segmentlerde P- dalga hızlarının düştüğü belirlenmiştir. Marmara bölgesinin ortalama Moho derinliği ise 28 km olarak saptanmıştır. Marmara bölgesinin kabuk yapısındaki bu düşük hızlı alanları belirlemek büyük depremler üretebilecek segmentlerin saptanması bakımından önemlidir. Bu da marmara bölgesinin kabuk yapısının belirlenmesini önemli kılmaktadır.

DETERMINATION OF MARMARA REGION P WAVE VELOCITY AND THE CRUSTAL THICKNESS

Keywords

*P wave velocity,
Seismic Tomography,
Seismic Velocity,
Marmara Region,
Crustal Structures.*

Abstract

In this study, we determined three-dimensional P- wave tomography images of the crustal structure of the Marmara region and under the Marmara Sea. Poisson Ratio Tomography method was used in this process. With this method, the parameters of the arrival times of the body waves were calculated. The P- wave arrival times of 121574 earthquakes that occurred in the study area between 2007 and 2019 were used to determine the three-dimensional velocity structure of the region. As the initial velocity model, the checkerboard resolution test was applied with many models, and the tomography method was performed with the velocity model, where we got the highest resolution. From the results we obtained, it was determined that the velocities decreased in the central part of Marmara. In general, the seismic velocities show a decrease from the depth of the velocities approximately 15 km. Unlike other studies, it was determined in which segments the P-wave velocities decreased on the branches of the North Anatolian Fault Zone. The average Moho depth of the Marmara region is 28 km. Identifying these low-velocity areas in the crustal structure of the Marmara region is important in terms of identifying segments that can produce large earthquakes. This makes it important to determine the crustal structure of the Marmara region.

Alıntı / Cite

Demirsikan, İ.H., Şahin, Ş., Öksüm, E., (2022). Marmara Bölgesi P Dalga Hızı Değişimi ve Kabuk Kalınlığının Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 110-125.

* İlgili yazar / Corresponding author: ibrahimdemirsikan@sdu.edu.tr, +90-246-211-1352

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
İ. H. Demirsikan, 0000-0003-2332-4035	Başvuru Tarihi / Submission Date	10.05.2021
Ş. Şahin, 0000-0001-6345-5270	Revizyon Tarihi / Revision Date	09.09.2021
E. Öksüm, 0000-0001-8386-9411	Kabul Tarihi / Accepted Date	05.10.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Sismik tomografi'nin kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Kabuk ve üst mantonun üç boyutlu olarak hız yapısını ortaya çıkarmak amacıyla yerel veya bölgesel olarak uygulanabilir bir yöntemdir. Üç boyutlu sismik tomografi özellikle deprem etkinliğinin fazla olduğu ve volkanik aktivitenin yoğun olduğu bölgelerde başarıyla uygulanmaktadır. Yatay yönde kabuk ve üst mantodaki heterojenitenin yüksek olduğu genç veya aktif volkanlar ve jeotermal bölgeler, telesismik ve yerel depremleri kullanan sismik tomografi yöntemleri için uygun alanları oluşturmaktadır (Iyer, 1984). Marmara bölgesinin aktif sismisitesinden dolayı Sismik tomografi yöntemi başarılı sonuçlar vermektedir. Marmara bölgesinde son çeyrek yüzyılda 17 Ağustos 1999 Gölcük ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri gibi iki önemli deprem meydana gelmiştir. Bu aktivitenin son çeyrek yüzyılda arttığı aşikardır. Son 10 yıla baktığımızda Marmara Denizi'ni 7 Haziran 2012 tarihinde Marmara Ereğlisi-Tekirdağ açıklarında 5.1 (Ml) büyüklüğünde ve 26 Eylül 2019 tarihinde Silivri açıklarında büyüklüğü 5.7 (Mw) olan 2 adet deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerin iki segment arasında (Kumburgaz-Tekirdağ segmenti) olduğu gözlemlenmiştir. Bu oluşan depremler bölgenin kabuk yapısının incelenmesini önemli kılmaktadır. Bu çalışmada ise Marmara bölgesindeki Kuzey Anadolu Fay Zonunun kolları üzerindeki segmentlerin sismik hız değişimlerini belirleme amacı taşımaktadır.

Çalışma bölgesinde yapılan Nakamura vd. (2002), Karabulut vd. (2003), Barış vd. (2005) Tunç (2008), Koulakov vd. (2009), Bohnhoff vd. (2017) ve Gholamrezaie vd. (2019) diğer çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar yeni yapılan çalışmalara ışık tutmakta ve gün geçtikçe bu yeni çalışmaların sayısı artmaktadır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Zhao vd., (1992) tarafından yapılan çalışmada sismik tomografi yöntemi uygulanmıştır. Bu çalışma Tomografik Yöntemimizin temel taşı oluşturulmaktadır. Bir dizi karmaşık şekilli sismik hız süreksizliği ve modelleme alanındaki hızlarda üç boyutlu değişimler ile genel bir hız yapısına uyum sağlamak için geliştirilmiş bir yöntemdir. Snell yasasını yinelemeli olarak kullanan etkili bir üç boyutlu ışın izleme algoritması geliştirilmiştir. Bu yöntem, kuzeydoğu Japonya'nın altındaki P ve S dalgası tomografik görüntülerini incelemek için 470 sığ ve orta derinlikli depremlerden 18.679 varış süresine uygulanmıştır. Pasifik plakasındaki dalma batma zonunun belirlenmesi için ilk P ve S dalgası varış zamanlarına ek olarak, Moho'da dönüşüme uğrayan SP ve PS fazları kullanılmıştır. 200 km derinliğe kadar yüksek çözünürlüklü P ve S dalgası tomografik görüntüleri belirlenmiştir. Kabuk ve üst mantoda P dalgası için % 6 ve S dalgası için % 10 olan büyük hız varyasyonları ortaya çıktığını öne sürmüşlerdir. Kabukta aktif volkanların altında düşük hız bölgeleri bulunduğu ve düşük pasif plakaya karşılık gelen yüksek hızlı bir bölge açıkça tanımlanmıştır.

Nakamura vd. (2002) tarafından 1999 yılında olan magnitudü 7.4 Mw olan İzmit depremi odağının batısında odak uzaklığı ve odak mekanizma çözümleri ile üç boyutlu P dalga hızı yapısını belirlemişlerdir. P- dalgasından elde edilen hız yapısı, ana şok odağının batısında belirgin hız değerlerinin düşük olduğu bir alan tespit etmişlerdir.

Karabulut vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada KAFZ'nun Marmara Denizi'ndeki kollarının ve tektonik olarak aktif Çınarcık Havzası'nın 2-B hız modelini öne sürmüşlerdir. Doğu Marmarayı kapsayan 10'km derinliğe kadar olan 2 boyutlu tomografik sismik hız görüntüsünü elde etmişlerdir. Bu hız modeli'nin 7 km kabuk derinliğine kadar önemli heterojenlikler gösterdiğini öne sürmüşlerdir.

Barış vd. (2005) tarafından Marmara Bölgesi'nde 1985 - 2002 yılları arasında oluşan tüm depremlerden elde edilen faz okumalarıyla bölgenin 3 boyutlu P dalgası hız yapısı incelenmiştir. Doğuda yüksek hız alanların var olduğu İzmit ve kuzeyinde yüksek hızların görüldüğü fakat Marmara Denizi'nin orta kesiminde hızların düştüğü görülmektedir. Bu düşük hız 15 km'lik derinlik bölgelerinde hakim olduğunu söylemişlerdir. Buda bizim sonuçlarımızla uyum göstermektedir.

Tunç (2008)'tarafından Marmara Bölgesi için tomografik ters çözüm yöntemi ile üç boyutlu hız yapısı belirlenmiştir. Çalışmada, 1993-2007 yılları arasında Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından işletilen istasyonlara ait deprem verileri kullanılmıştır. KAFZ'nu üzerinde hız yapılarının oldukça ani yanal değişimler gösterdiği görülmektedir. Fay boyunca kırıklı yapı nedeniyle beklenenden

daha fazla P ve S hızı dağılımları gözlenmektedir. Fayın İzmit Körfezi'ne girdiği bölgede, hem P hem de S dalga hızlarında artış olduğunu söylemişlerdir.

Koulakov vd. (2009)' tarafından yapılan çalışmada Kuzey Anadolu fay zonunun (KAFZ) batı kısmının altındaki kabuk yapısını araştırmışlardır. Düşük hız ve yüksek zayıflama modelleri çoğunlukla KAFZ'nin kırılma bölgeleri ile ilişkilidir. Ana tortul havzaların (örn. Adapazarı, Düzce ve Kuzuluk) altında da düşük hızlar gözlenir. Yüksek hız ve düşük zayıflama modelleri, rijit olduğu varsayılan bloklarla (Kocaeli, Armutlu ve Almacık blokları) ilişkili olduğu öne sürülmüştür.

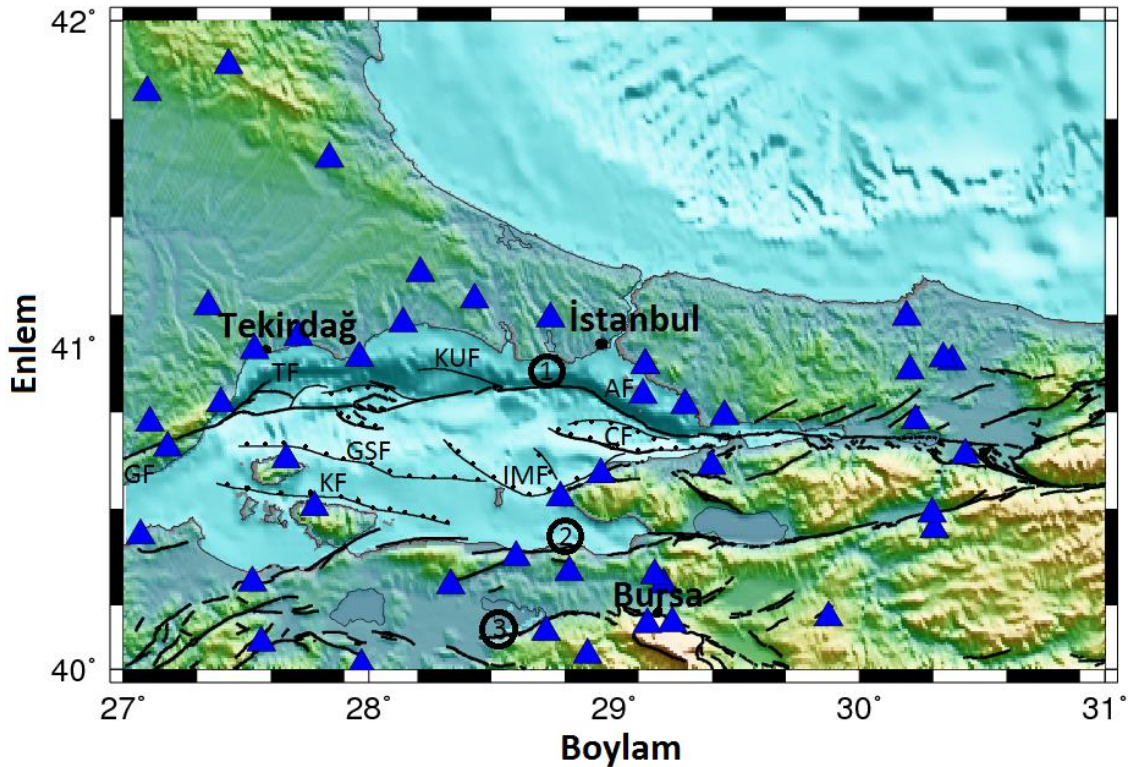
Bohnhoff vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, yoğun sismik aktivite ve hasar yapıcı deprem yaratma potansiyeli göz önüne alındığında, KAFZ'nun batı kısmı ciddi bir doğal tehlike oluşturmaktadır olduğu ortaya konulmuştur. Bu bölgedeki uzun vadeli projelerden biri, Türkiye'nin ilk sondaj sismometre ağı projesi olan GONAF (Kuzey Anadolu Fayı Jeofizik Kuyu Gözlemevi) dir. GONAF, bölgedeki mikrosismik aktiviteyi tespit etmek, incelemek ve izlemek amacıyla kurulmuştur. Aynı zamanda Kuzey Anadolu'nun batı bölümünü kırması beklenen büyük bir Marmara depreminden önce, sırasında ve sonrasında fiziksel süreçleri gözlemlemiştir.

Gholamrezaie vd. (2019) tarafından Kuzey Marmara Denizi'nin P-dalga hızları heterojenitesi ilk varış zamanları kullanılarak ters çözüm tekniği ile üç boyutlu tomografik olarak tespit edilmiştir. Yerel deprem tomografisi için 3 boyutlu bir başlangıç modeli oluşturmuşlardır. Elde edilen özelliklerin güvenilirliği dama tahtası testleri ayrıca derin penetrasyonlu çok kanallı sismik profiller, geniş açılı yansıma ve kırılma modeli profiller ile karşılaştırılmalı olarak kontrol etmişlerdir. Sonuç olarak KAFZ kuzey kolunun Tekirdağ ve Adalar segmentlerinin altında gravite değerlerinin yükseldiğini bu yükselmenin nedeninin manto sokulumu olabileceğini öne sürmüşlerdir. Bizim çalışmamızda ise KAFZ kuzey kolunun Tekirdağ ve Adalar segmentlerinin altında hızların düştüğü görülmektedir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Çalışma Alanı (Study Area)

Çalışma alanı, Marmara Bölgesi'nin 40°K- 42° K enlemleri ve 27°D – 31°D boylamları ile sınırlanan alandır. Bölgede Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'ne (KRDAE) ait olan 38 adet kayıt istasyonu bulunmaktadır (Şekil 1).



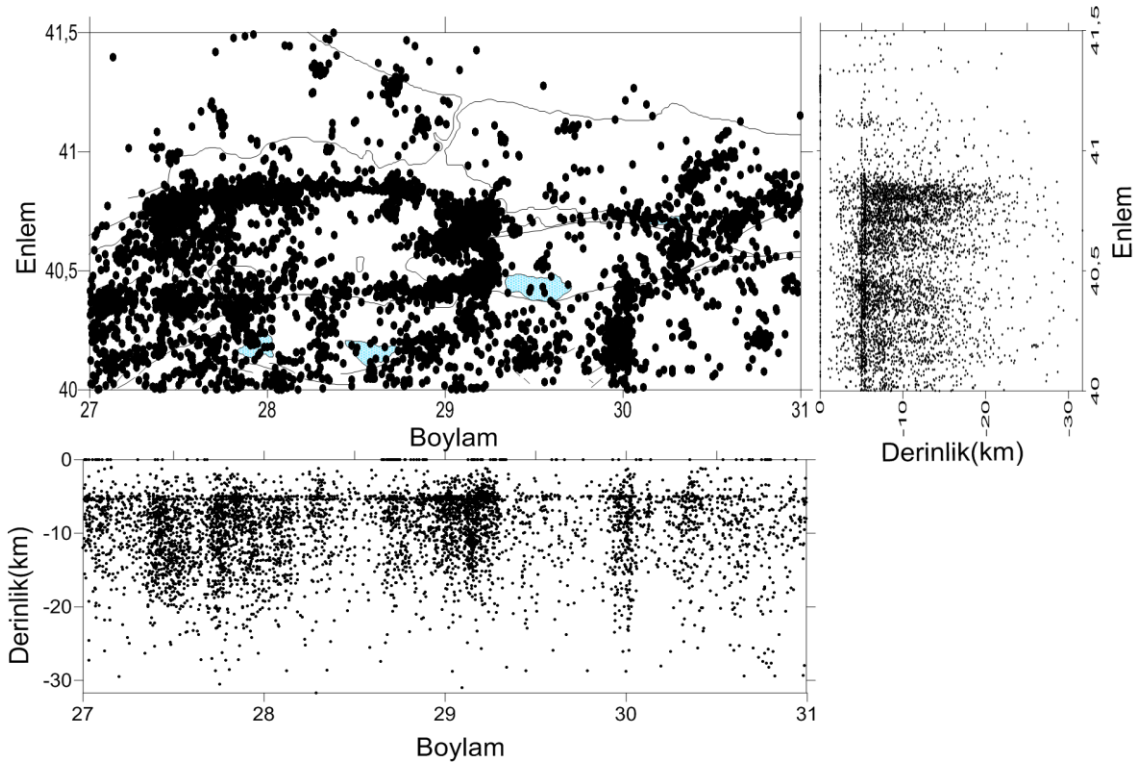
Şekil 1. Çalışma alanı ve Marmara Bölgesi tektonik unsurları (MTA, 2013). Bölgesinin genel tektoniğini oluşturan kuzey, orta ve güney kolları sırasıyla 1, 2 ve 3 numara ve siyah çizgi ile gösterilmiştir. Burada, GF; Ganos Fayını, TF; Tekirdağ fayını, KUF; Kumburgaz fayını, AF; Adalar fayını, KF; Kapıdağ fayını, GSF; Güney sınır fayını, IMF; İmralı fayını, ÇF; Çınarcık faylarını ifade etmektedir. Mavi üçgenler bölgedeki kayıt istasyonlarını göstermektedir (The study area and the tectonic elements of the

Marmara Region (MTA, 2013). The northern, middle and southern branches that make up the general tectonics of the region are shown with 1, 2 and 3 numbers and black lines. GF; Ganos Fault, TF; Tekirdag fault, KuF; Kumburgaz fault, AF; Adalar fault, KF; Kapıdağ fault, GSF; Southern boundary fault, İmF; İmrılı fault, CF; It represents the Çınarcık faults. Blue triangles indicate registration stations in the area)

Çalışma alanı içerisinde Kuzey kol, doğudan batıya doğru Gölcük-Karamürsel-Darıca, Adalar, Avcılar, Kumburgaz, Tekirdağ ve Ganos olmak üzere altı parçadan oluşmaktadır. Orta kol ise, Geyve- Mekece- İznik Gölü güneyi-Gemlik Körfezine kadar uzanmakta olup, Kapıdağ Yarımadasının Güneyine doğru KD-GB doğrultusunda ilerler (Şengör, 1980). Bu kol doğudan batıya doğru Gençali, Gemlik, İznik-Mekece, Zeytinbağı, Bandırma, Edincik ve Sinekçi fayları olmak üzere yedi parçadan oluşmaktadır. Güney kol ise, Ulubat, Edremit, Yenice-Gönen, Manyas ve ve Biga-Çan fay zonlarından oluşur (MTA, 2013).

3.2. Veri ve Yöntem (Data and Method)

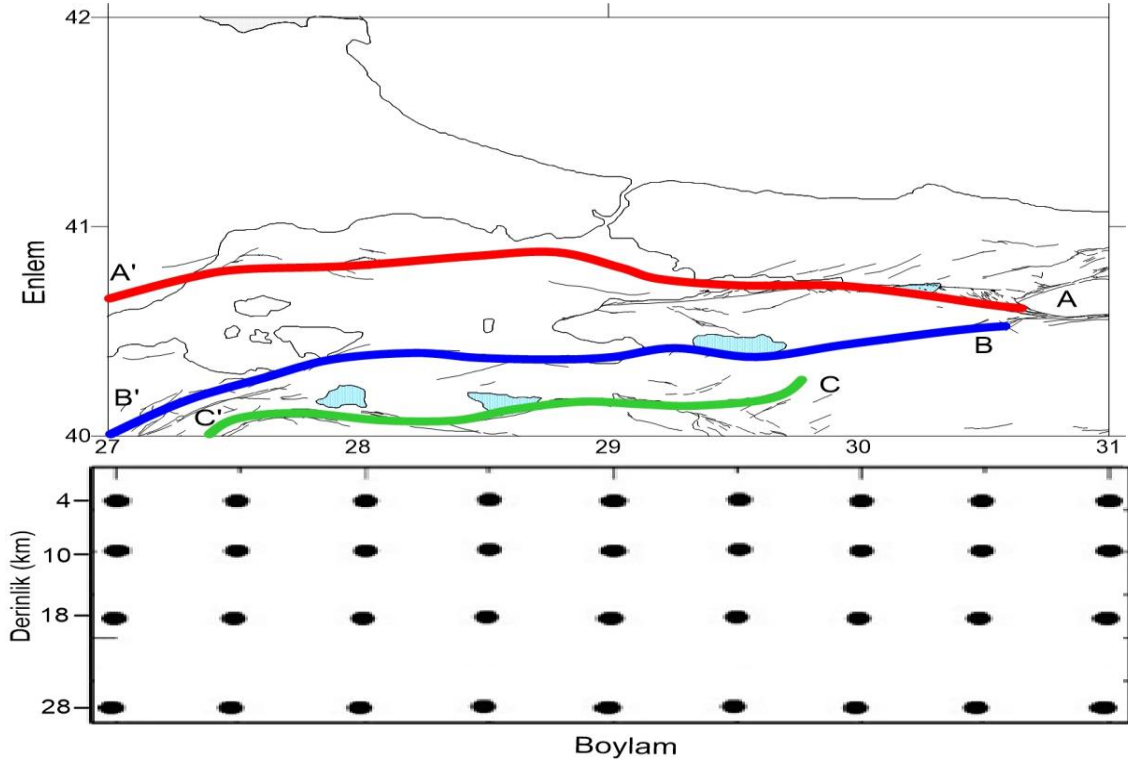
Marmara Bölgesi'nde 40°K - 42°K enlemleri ve 27°D - 31°D boylamları arasında 2007 - 2019 yılları arasında oluşan 132956 adet depreme ait 112574 adet P dalgası varış zamanı verisi kullanılmıştır. (Şekil 2). Bu veriler Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'ne (KRDAE) ait olan slusal sismik ağa bağlı, toplam 38 adet deprem istasyonu tarafından kaydedilmiştir (Şekil 1). Kullanılan ağa bağlı istasyonların örnekleme aralığı 50 Hz'dir. Veri kalitesi için sadece 4 istasyon ya da daha fazlası tarafından kaydedilen kaliteli veriler, Tomografi yönteminde kullanılmıştır.



Şekil 2. Çalışma bölgesindeki depremler verileri ve depremlerin derinlik dağılımları (Earthquake data in the study area and depth distribution of earthquakes)

Tomografik yöntemler cisim dalgaları olan P ve S dalgalarının varış zamanlarını analiz eder. Bu analiz sırasında oluşturulan modelin parametrelerini belirlemek tomografik yöntemlerin ana görevidir (Thurber ve Aki, 1987). Tomografik yöntem, kabuk ve manto yapısını belirlemek için modelin değerleri saptanır. Bu yapının geometrik şekli parametrelendirilirken öncelikli olarak bu şekil belirlenmeye çalışılır (Salah vd., 2007, Akyol vd., 2006, Soyuer, 2012). Hız dağılımı derinlikle değişimi belirlemek için iki boyutlu grid ağı oluşturulur (Şekil 3). Bu grid ağının derinlik dağılımındaki noktalardaki hız değişimleri belirlenir. Daha sonra bu noktalardaki hız değişimleri bilindiği zaman, grid ağı içerisinde herhangi bir noktanın hız değeri, o noktanın çevresindeki dört adet düğümünün uzaklığına bağlı oransal olarak interpolasyonu alınarak saptanır. Daha sonra bu oransal interpolasyon fonksiyonu kullanılarak gerçek hızlar hesaplanır (Zhao vd., 1992; Zhao vd., 1994; Zhao, 2001; Salah ve Zhao 2003; Zhao, 2004). Kullandığımız program TOMOG3D bilgisayar programı Fortran 77 dilinde yazılan programın arayüz programı olan TOMOTOOLS programıdır. Bu program yerel ağ tarafından kaydedilen depremlerin varış zamanlarını kullanarak bölgedeki hız değerlerini hesaplar. Tüm bu yapılan işlemlerin sonucunda kabuk ve üst manto için üç boyutlu bir sismik hız modeli üretmiş olur. Daha önce yapılan Yerel Deprem

Tomografisi (LET) algoritmaları ile benzerliği olsa da, TOMOTOOLS karmaşık hız süreksizlikleri için gerçeğe yakın bir modelleme yapması ile diğer algoritmalarından ön plandadır. Aynı zamanda hızlar arasındaki üç boyutlu varyasyonların elde edilmesinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. TOMOTOOLS'un bir önemli artışı daha güçlü ve verimli bir üç boyutlu ışın izleme güzergahlarını kapsamaktadır (Farouk ve Zhao, 2006).



Şekil 3. P- dalga hızı Tomografisi ve Checker Board analizi için oluşturulan derinlik grid düğümleri ve çalışma alanındaki KAFZ kolları üzerinden alınan A-A', B-B' ve C-C' kesitleri (A-A', B-B' and C-C' sections taken over the depth grid nodes and NAFZ arms in the study area created for P-wave velocity Tomography and Checker Board analysis)

A-A' kesiti Kuzey Anadolu Fay Zonunun kuzey kolundaki Düzce-Karamürsel segmentinden başlayıp Ganos segmentine kadar uzanan bir kesit, B-B' kesiti KAFZ orta kolundaki İznik-Mekece segmentinden başlayıp Biga-Çan kadar uzanan, C-C' kesiti ise KAFZ güney kolundaki Bursa-İnegöl segmentinden başlayıp Evciler segmentine kadar uzanan bir kesittir. Checkerboard ve Tomografi sonuçlarını alacağımız derinlik düğümleri 4km, 10km, 18km ve 28 km olarak gridlenmiştir (Şekil 3).

3.3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

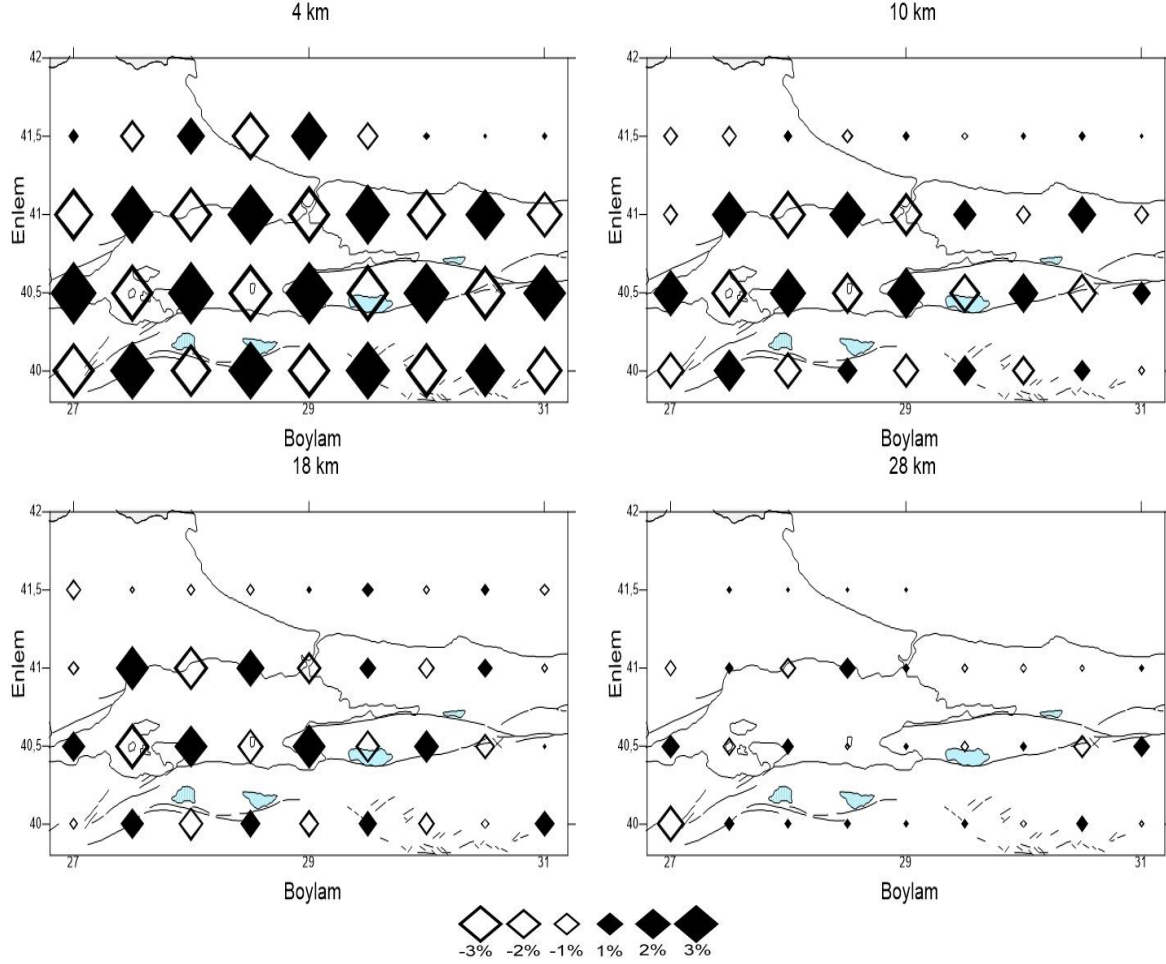
Sismik tomografi çalışmalarında, dama tahtası çözünürlük testleri, çözünürlüğün nerelerde yeterli, nerelerde zayıf olduğu ve yapılacak yorumun anlamlılığı ile güvenilirliği konusunda önemli sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu testler, çözümün doğruluğunun belirlenmesinde önemli bir yere sahip olup, çözünürlüğün yeterliliğinin değerlendirilmesi için geliştirilen yöntemlerdir. Tomografi çalışmalarında çözünürlüğü kontrol etmek için en yaygın sentetik test olarak Dama tahtası modeli kullanılır. Bu tez çalışmasında yapay testlerin bir türü olan CRT (dama tahtası çözünürlük testi) kullanılmıştır. CRT aynı zamanda bir doğruluk testidir. Bu test Humphreys ve Clayton (1988) tarafından geliştirilmiştir. Ard arda gelen pozitif ve negatif olacak şekilde belirlenen hız değişimi çalışma bölgesi için üç boyutlu olacak şekilde tasarlanır. Bu testte veri setine ters çözüm uygulanarak çözünürlük haritaları elde edilir ve çözünürlüğün yüksek ve zayıf olduğu yerler ortaya konulur.

Bu çalışmada, çalışma alanımız için en uyumlu hız modelini belirlemek yani modelimize en uygun hız değerini seçmek için, bölgede daha önce yapılmış jeofizik çalışmalarda tespit edilen hız ve derinlik modelleri kullanarak dama tahtası çözünürlük modelleri elde edilmiştir. Akyol vd. (2006), Barış vd. (2002), Horasan vd. (2002), Nakamura vd. (2002), Özalaybey vd. (2002) ve Çevikbilen vd. 2011 tarafından üretilen hız modelleri kullanılarak Marmara Bölgesi için belirli derinliklerde dama tahtası çözünürlük haritaları oluşturulmuştur.

Checkerboard modeli başlangıç hız değerlerimizi; bölge için, Tablo 1' deki Akyol vd. 2006 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullandık.

Tablo 1. Başlangıç hız değerleri (Initial velocity values) (Akyol et al. 2006)

Derinlik (km)	Vp (km/sn)	Vs (km/sn)
0	3.86	2.20
7	5.99	3.42
25	6.20	3.54
81	8.10	4.62



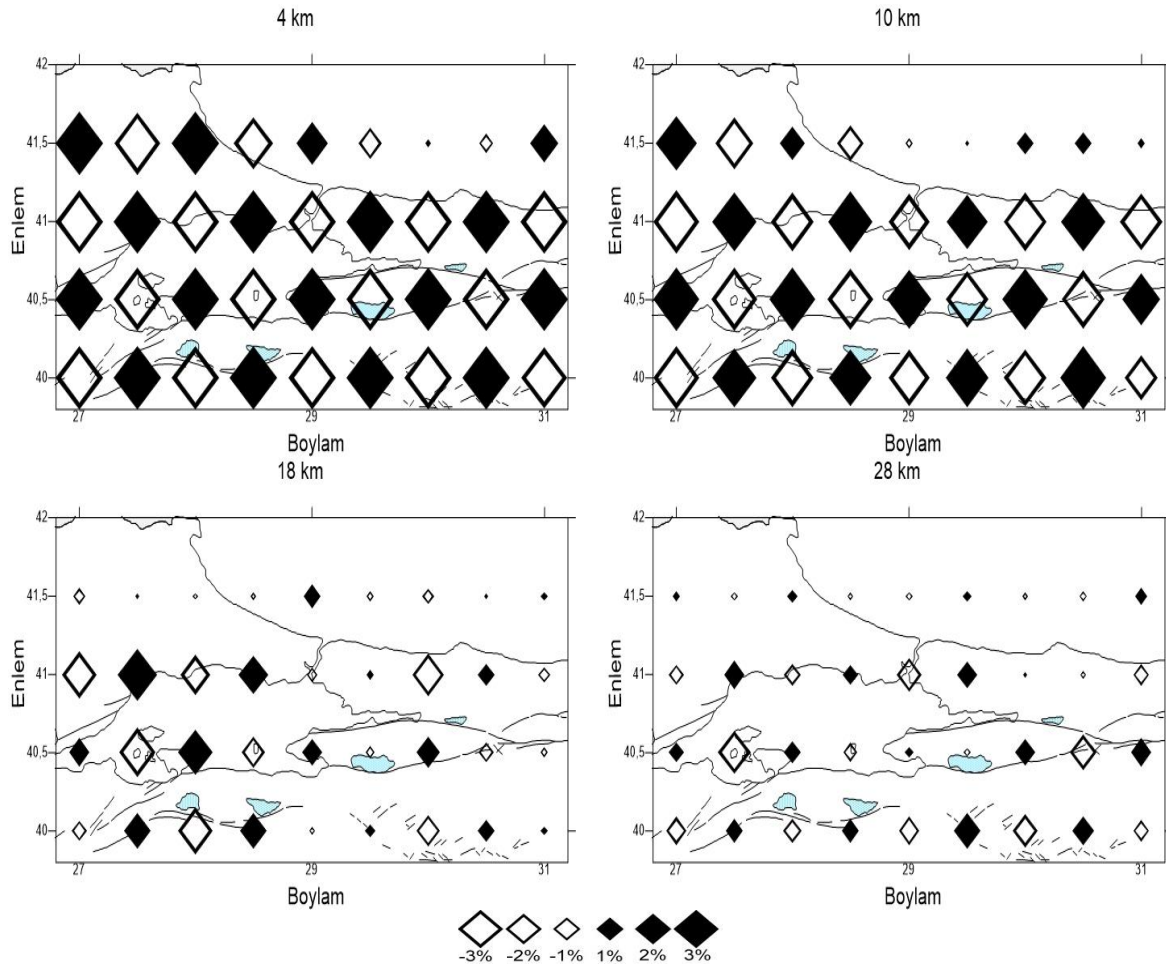
Şekil 4. P- dalga hızı için dama tahtası çözünürlük modeli. Siyah ve beyaz semboller sırasıyla yüksek ve düşük hızları göstermektedir. Değişim skalası altta verilmiştir (Checkerboard resolution model for P-wave velocity. Black and white symbols indicate high and low speeds, respectively. The scale of change is given below)

Akyol vd. 2006 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullanılarak oluşturulan dama tahtası çözünürlük haritalarında 10 km ye kadar iyi çözünürlük vermesine rağmen 18 km civarında çözünürlük düşmekte ve daha derinlerde iyice azalmaktadır (Şekil 4).

Checkerboard modeli başlangıç hız değerlerimizi; bölge için, Tablo 2' deki Barış vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullandık.

Tablo 2. Başlangıç hız değerleri (Initial velocity values) (Barış et al. 2002)

Derinlik (km)	Vp (km/sn)	Vs (km/sn)
0.0	4.50	2,50
5.0	6.00	3,50
30.0	8.00	4.50
90.0	8.50	5.00



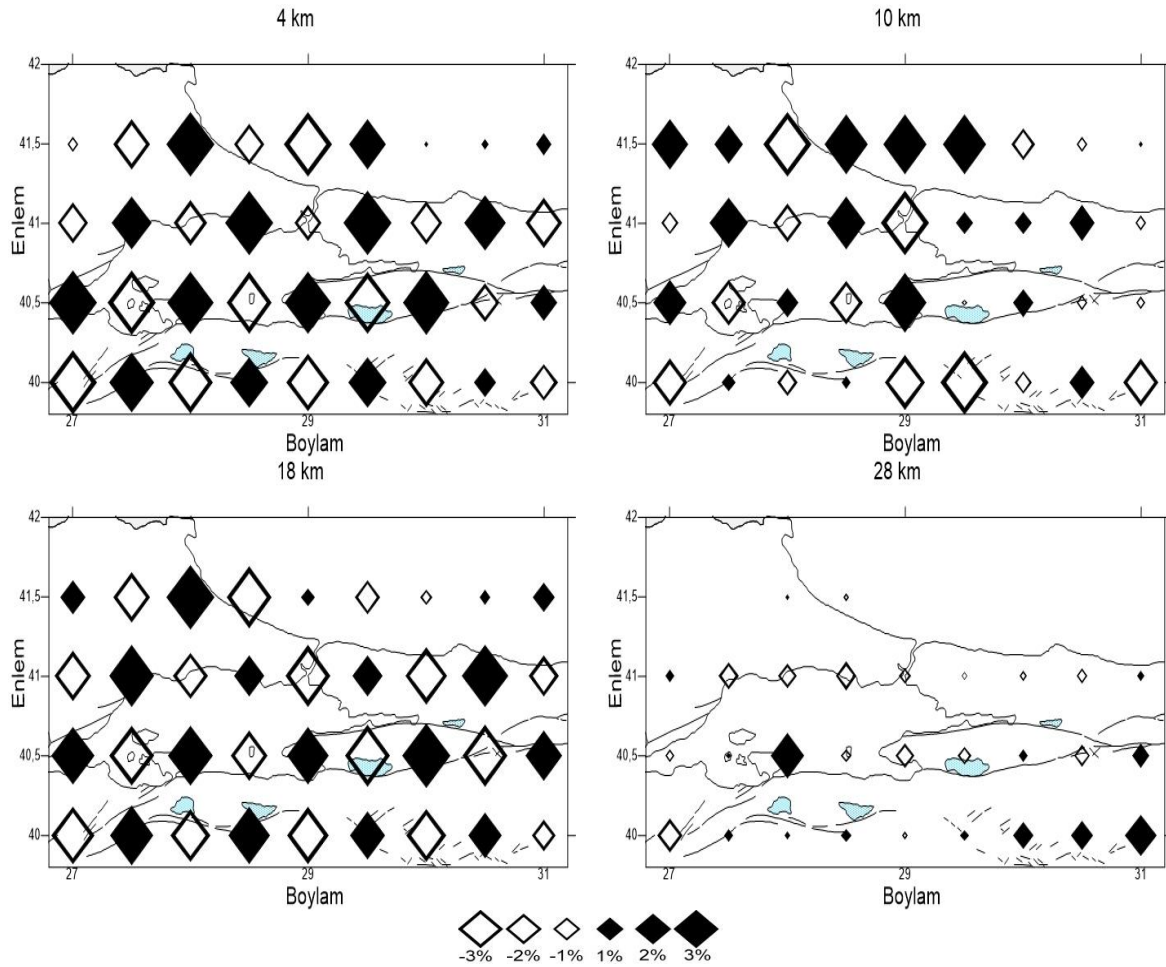
Şekil 5. P- dalga hızı için dama tahtası çözünürlük modeli. Siyah ve beyaz semboller sırasıyla yüksek ve düşük hızları göstermektedir. Değişim skalası altta verilmiştir (Checkerboard resolution model for P-wave velocity. Black and white symbols indicate high and low speeds, respectively. Change scale is given below)

Barış vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullanılarak oluşturulan dama tahtası çözünürlük haritalarında yine Akyol vd. 2006 gibi 10 km ye kadar çözünürlüğün çok iyi olmasına rağmen 18 km civarında çözünürlük düşmekte ve daha derinlerde iyice azalmaktadır (Şekil 5).

Checkerboard modeli başlangıç hız değerlerimizi; bölge için, Tablo 3' deki Horasan vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullandık.

Tablo 3. Başlangıç hız değerleri (Initial velocity values) (Horasan et al. 2002)

Derinlik (km)	V _p (km/sn)	V _s (km/sn)
0.0	3.50	2,20
4.0	5.90	3,40
17.5	6.20	3.60
32.0	8.00	4.40



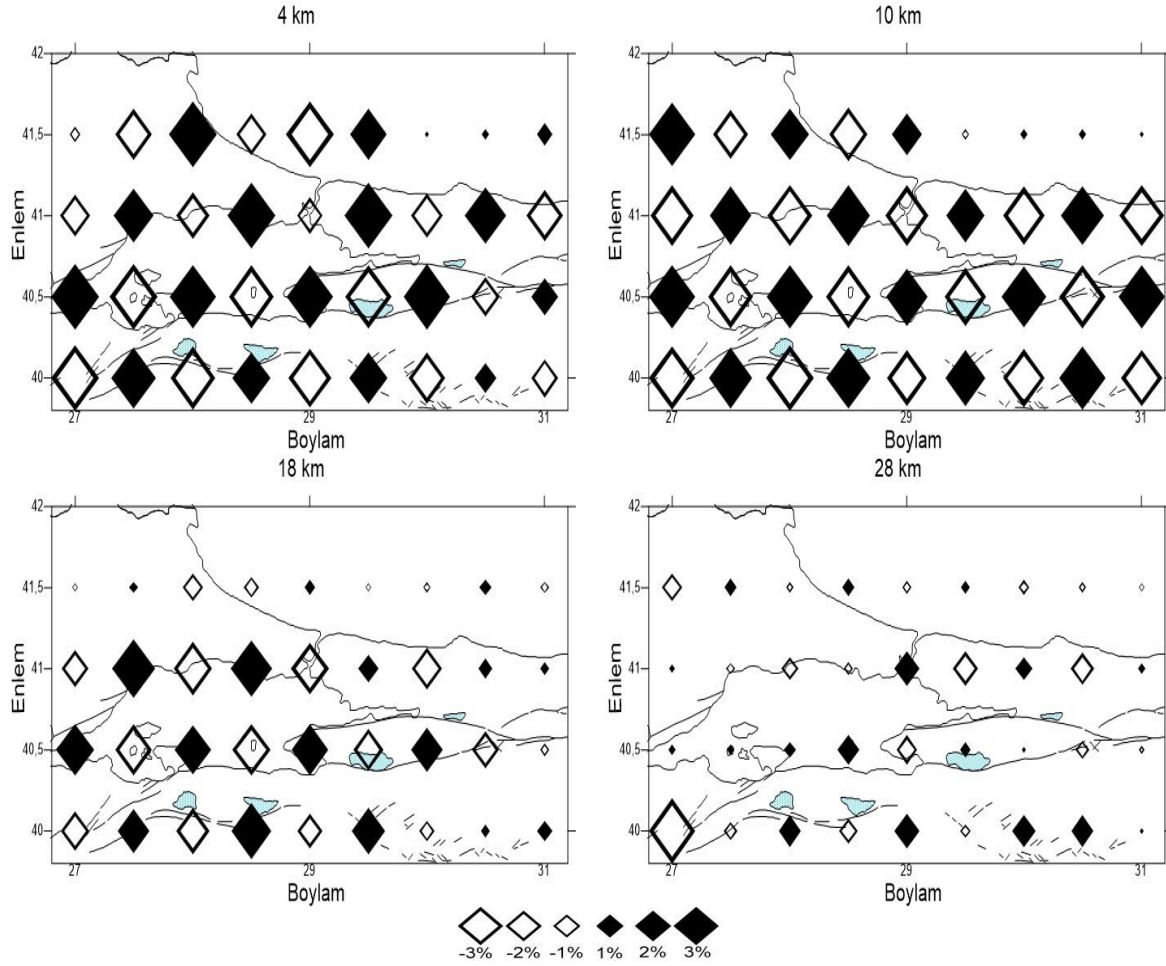
Şekil 6. P- dalga hızı için dama tahtası çözünürlük modeli. Siyah ve beyaz semboller sırasıyla yüksek ve düşük hızları göstermektedir. Değişim skalası altta verilmiştir (Checkerboard resolution model for P-wave velocity. Black and white symbols indicate high and low speeds, respectively. Change scale is given below)

Horasan vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullanılarak oluşturulan dama tahtası çözünürlük haritalarında 10 km ve civarında modelimize uymayan pozitif hızlarda ard arda sıralanma görülmektedir. 18 km civarında çözünürlüğün iyi olmasına rağmen 28 km'ye kadar çözünürlük düşmektedir (Şekil 6).

Checkerboard modeli başlangıç hız değerlerimizi; bölge için, Tablo 4' deki Nakamura vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullandık.

Tablo 4. Başlangıç hız değerleri (Initial velocity values) (Nakamura et al. 2002)

Derinlik (km)	V _p (km/sn)
1.0	3.50
7.0	5.70
24.0	6.80
81.0	7.80



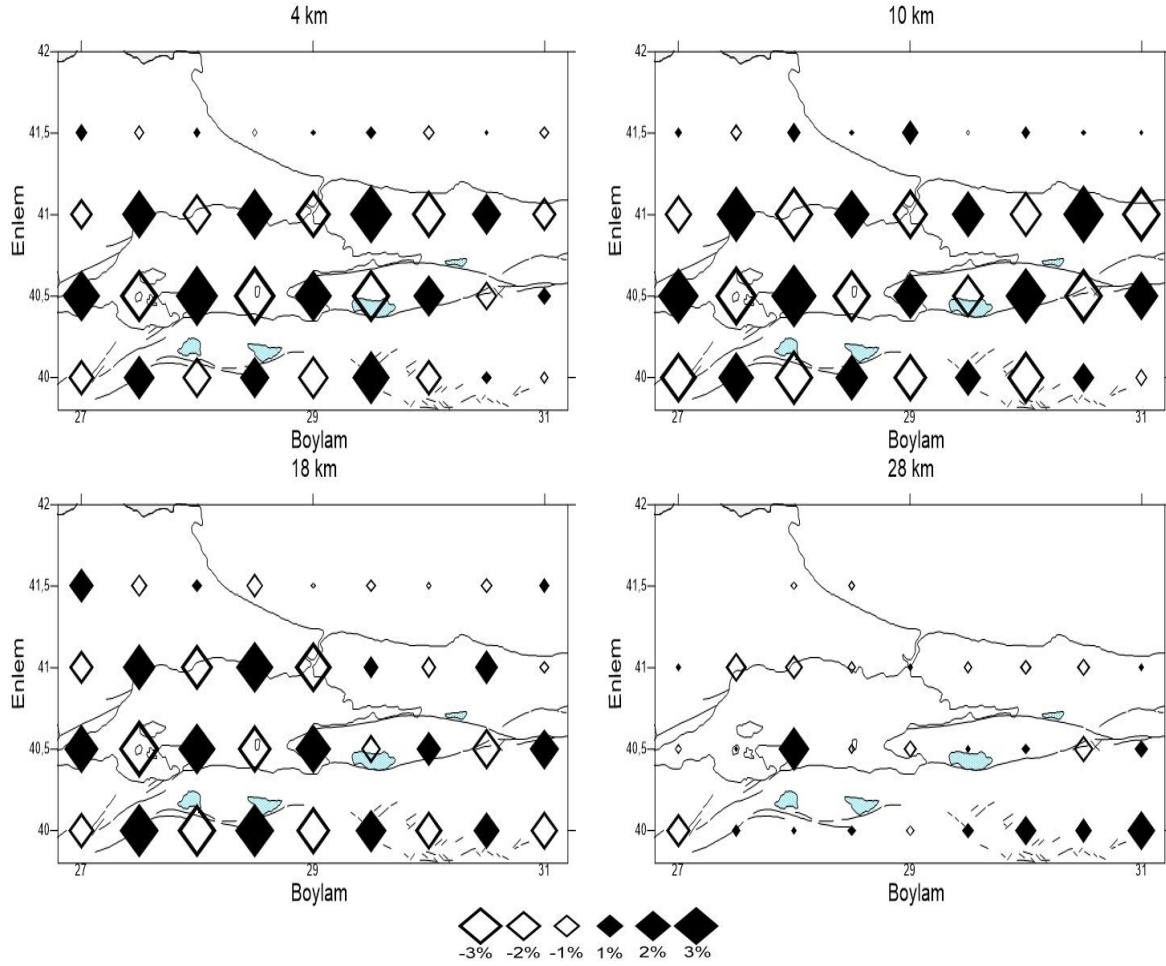
Şekil 7. P- dalga hızı için dama tahtası çözünürlük modeli. Siyah ve beyaz semboller sırasıyla yüksek ve düşük hızları göstermektedir. Değişim skalası altta verilmiştir (Checkerboard resolution model for P-wave velocity. Black and white symbols indicate high and low speeds, respectively. Change scale is given below)

Nakamura vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullanılarak oluşturulan dama tahtası çözünürlük haritalarında 10 km ve civarında iyi çözünürlük vermekte fakat 18 km civarında çözünürlük nispeten iyi olmasına rağmen 28 km'ye kadar çözünürlük bozulmakta ve düşmektedir (Şekil 7).

Checkerboard modeli başlangıç hız değerlerimizi; bölge için, Tablo 5' deki Özalaybey vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullandık.

Tablo 5. Başlangıç hız değerleri (Initial velocity values) (Özalaybey et al. 2002)

Derinlik (km)	V _p (km/sn)	V _s (km/sn)
0.0	2.90	1.68
1.0	5.70	3.29
6.0	6.10	3.53
20.0	6.80	3.93



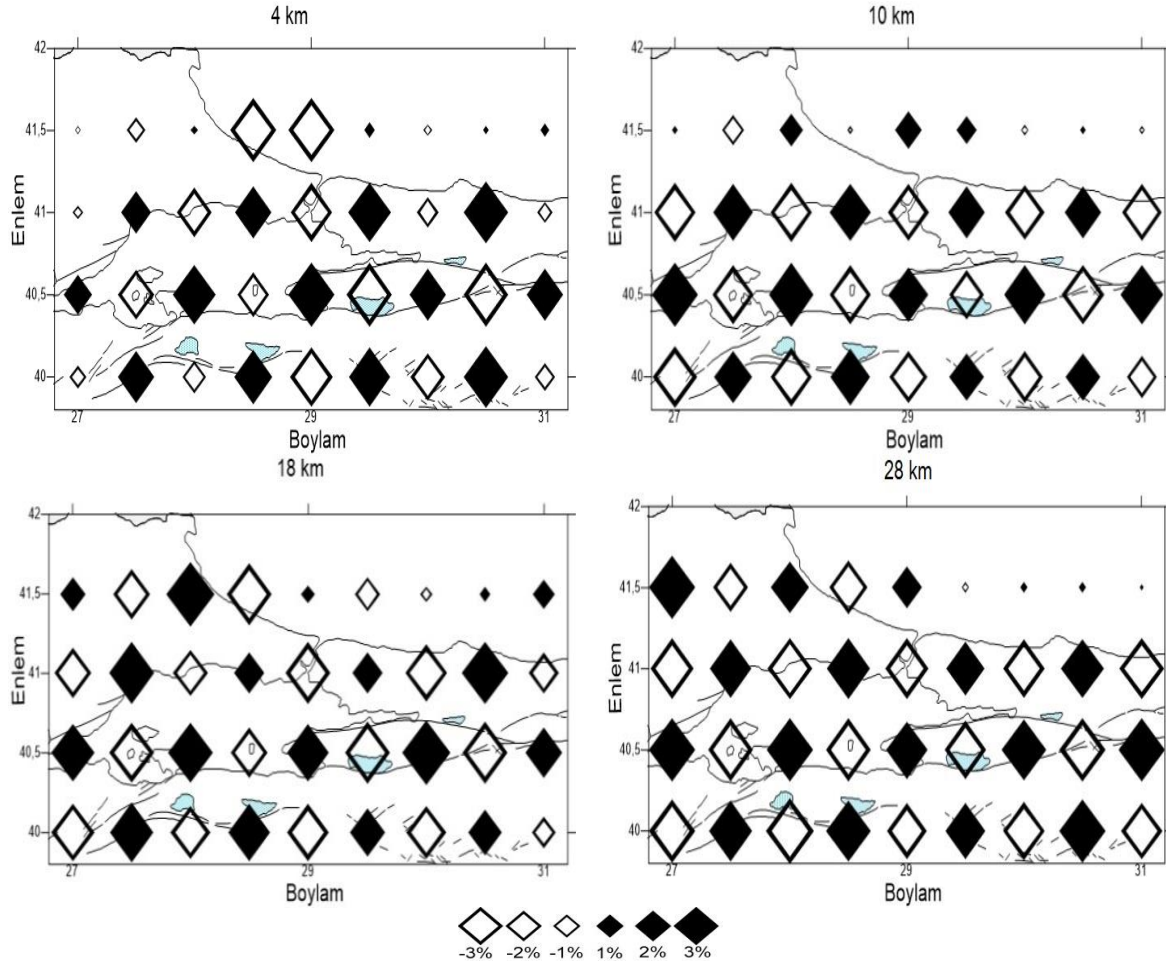
Şekil 8. P- dalga hızı için dama tahtası çözünürlük modeli. Siyah ve beyaz semboller sırasıyla yüksek ve düşük hızları göstermektedir. Değişim skalası altta verilmiştir (Checkerboard resolution model for P-wave velocity. Black and white symbols indicate high and low speeds, respectively. Change scale is given below)

Özalaybey vd. 2002 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullanarak oluşturulan dama tahtası çözünürlük haritalarında 18 km ve civarında kadar olan derinliklerde iyi çözünürlük vermekte fakat 28 km civarında çözünürlük yok denecek kadar bozulmakta ve düşmektedir (Şekil 8).

Checkerboard modeli için başlangıç hız değerlerimizi bölge ile uyumlu olduğumu düşündüğümüz Tablo 6' deki Çevikbilen vd. 2011 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullandık.

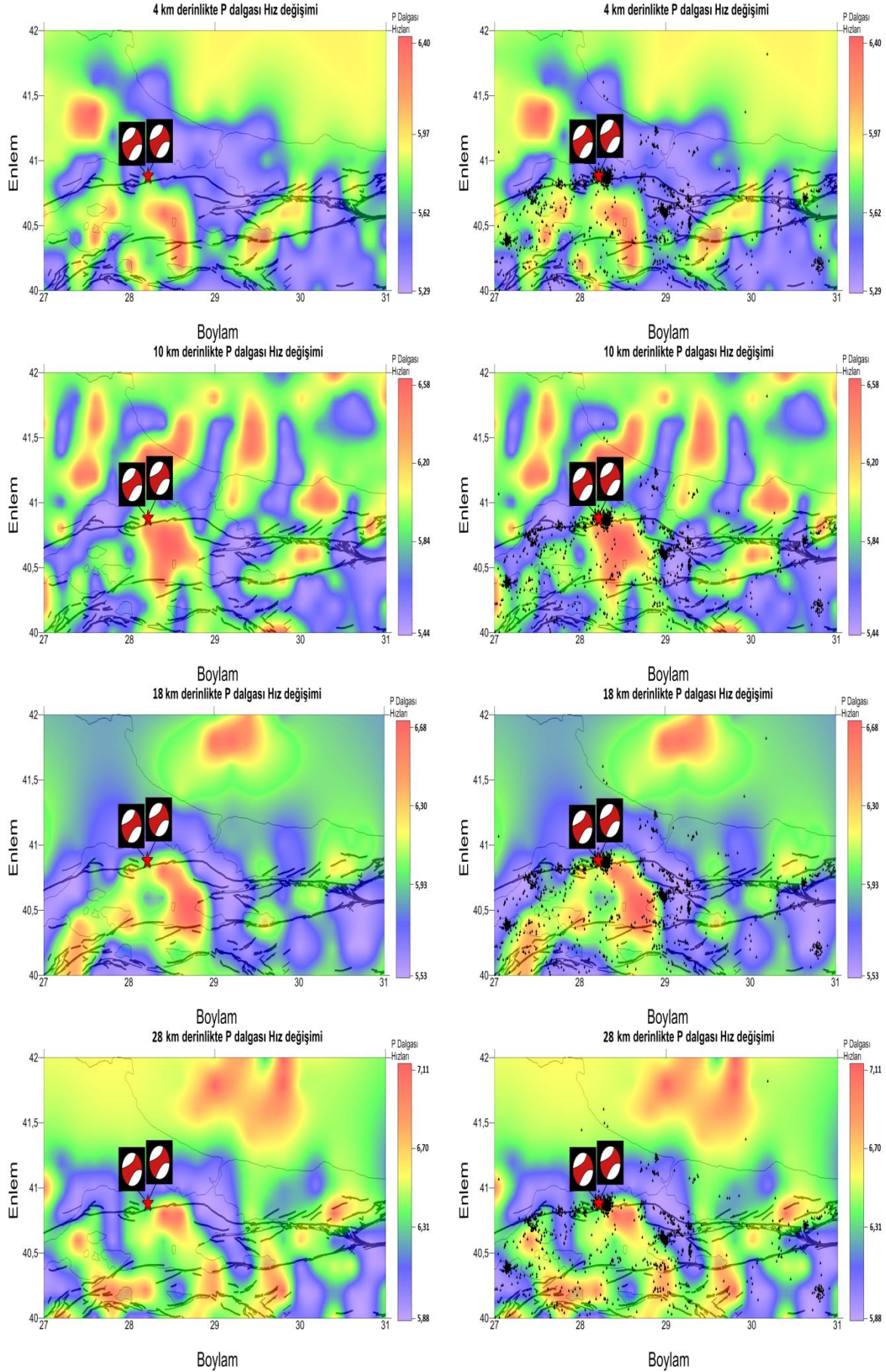
Tablo 6. Başlangıç hız değerleri (Initial velocity values) (Çevikbilen et al. 2011)

Derinlik (km)	Vp (km/sn)	Vs (km/sn)
0	3.86	2.20
7	5.99	3.42
25	6.20	3.54
81	8.10	4.62



Şekil 9. P- dalga hızı için dama tahtası çözünürlük modeli. Siyah ve beyaz semboller sırasıyla yüksek ve düşük hızları göstermektedir. Değişim skalası altta verilmiştir (Checkerboard resolution model for P-wave velocity. Black and white symbols indicate high and low speeds, respectively. Change scale is given below)

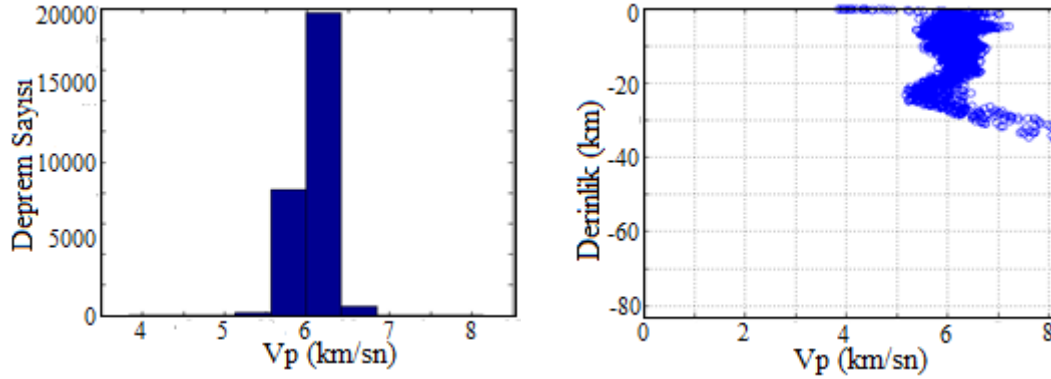
Çevikbilen vd. 2011 tarafından oluşturulan 1 boyutlu hız değerlerini kullanılarak oluşturulan dama tahtası çözünürlük haritalarında tüm grid düğüm derinliklerinde 4km, 10km, 18km ve 28km için çözünürlüklerin yüksek olduğu gözlemlenmektedir. 4 km ve civarında çalışma bölgesinin batısında yüzey jeolojisinden kaynaklı çözünürlük az düşse, dama tahtası çözünürlük testi için +3 ile +3 arasında değişen çözünürlük farkları diğer modellere göre belirgin şekilde iyi görülmektedir (Şekil 9).



Şekil 10. Sırası ile 4, 10, 18 ve 28 km derinlikler için P- dalga hız değişimleri. Siyah noktalar son 1 yıl içinde oluşan depremleri gösterirken 24 ve 26 Eylül 2019 tarihlerinde meydana gelen magnitüdü 5 ve üzeri iki adet depremin fay mekanizma çözümleri kırmızı-beyaz toplanla gösterilmiştir. Pdalga hızları sağdaki renk sıkalasında gösterilmiştir (P-wave

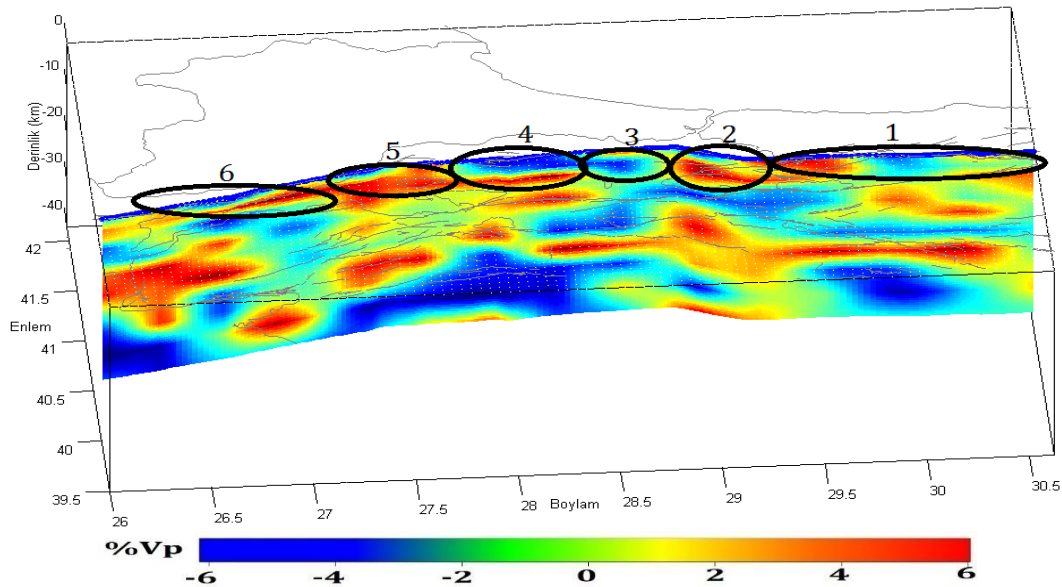
velocity variations for depths of 4, 10, 18 and 28 km. The black dots show the earthquakes that have occurred in the last 1 year, the fault mechanism solutions of the two earthquakes with a magnitude of 5 and above that occurred on September 24 and 26, 2019 are shown with red-white balls. Pwave speeds are shown in the right color scale)

Tomografi sonuçlarına 18km derinlikte P dalgası hızlarında genel bir düşüş yaşandığı gözlemlenmektedir. Daha sonra 25 km'den sonra P dalga hızının yüksek artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Oluşan depremler P dalgasının yüksek hızdan düşük hıza geçiş bölgelerinde kümeleştiği gözlemlenmiştir(Şekil 10).



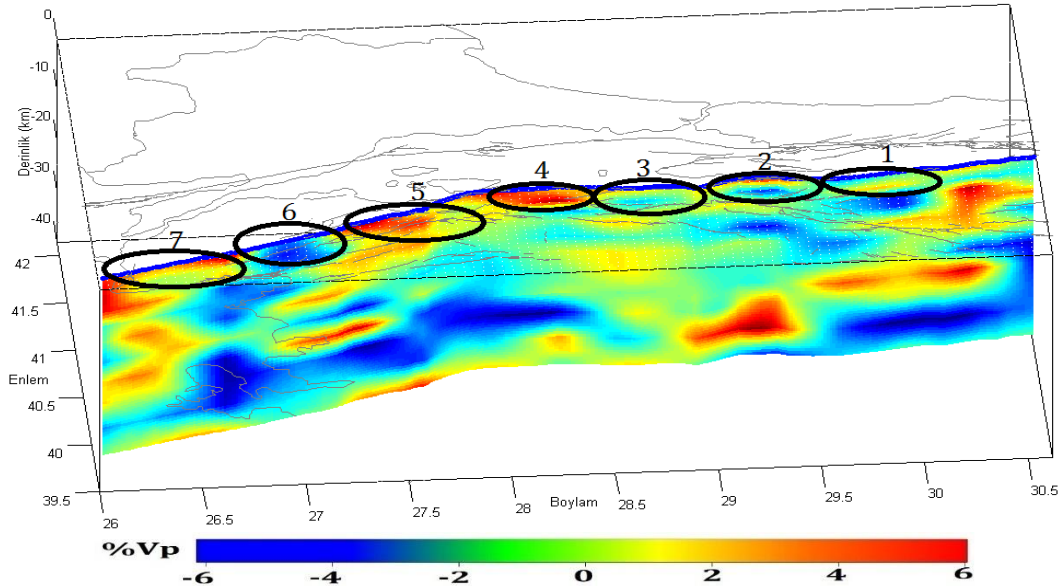
Şekil 11. P dalgası hızı ile deprem sayısı arasındaki ilişki ve P dalga hızının Derinlik ile değişimleri grafikleri (Graphs of the relationship between P wave velocity and the number of earthquakes and the variation of P wave velocity with Depth)

Şekil 11'de gerçek hız değerleri ile deprem sayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Marmara Bölgesinde depremler P dalgası hızının 3.5 ila 8.3 km/sn aralığında olan bölgelerde olduğu tespit edilmiştir. Ancak en fazla depremin olduğu alan P dalgası için 5 ila 7 km/s'dir. P dalga hızının derinlik ile değişimleri grafiği depremlerin odak derinliği ile P dalga hızları arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Depremler yüzeye yakın alanlarda düşük hızlı alanlarda oluşmakta ve geniş alana yayılmaktadır. Ancak derine doğru indikçe hızın daha yüksek olduğu alanlarda meydana gelmektedir. 28-32 km derinlikten sonra alt kabukta depremlerin P dalgası hızının sıkışmanın olduğu bazı yerlerde 7 ila 8.3 km/sn arasında değişen alanlarda meydana geldiği tespit edilmiştir. P dalga hızlarının 15 km ye kadar artış gösterdiği daha sonrasında ise 15 km den sonra genel bir düşüş gösterdiği görülmektedir. 25 km den sonra ise tekrar yükseldiği grafikten gözlemlenmektedir. Bu derinlik değişim grafiklerinden görüleceği üzere 15-25 km arası derinlikte hızların düştüğü alanların varlığından söz edilebilir.



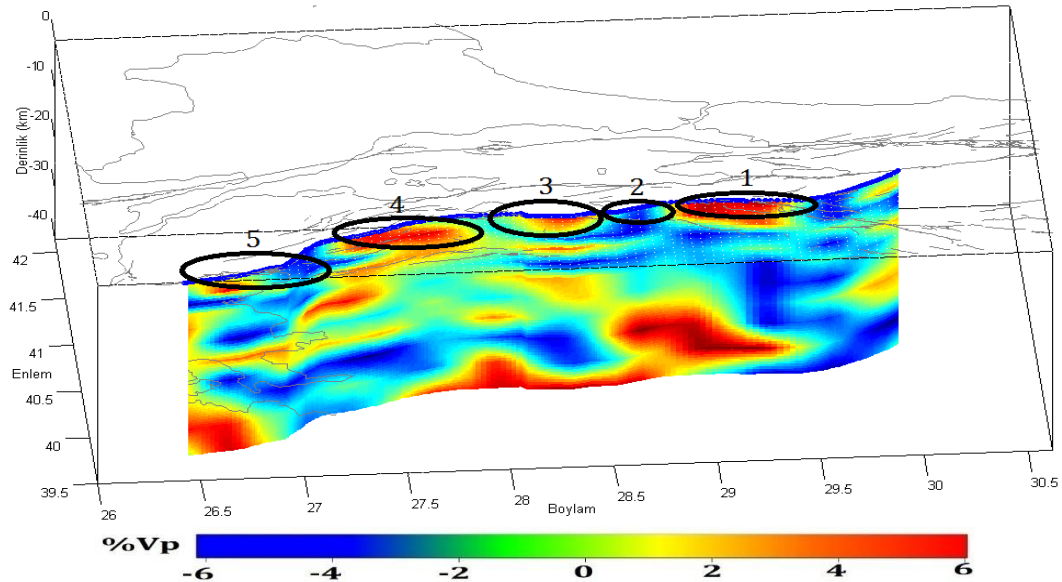
Şekil 12. KAFZ kuzey kolu P- dalga yüzdelik hız değişimi kesiti. Kol üzerinde daire ile numaralandırılan fay parçaları MTA 2013 Türkiye Diri Fay haritası'ndaki fay segmentlerinin yerleridir. Değişim skala şeklinin altında verilmiştir (Cross section of the NAFZ north branch P-wave percentage velocity change. The fault segments numbered with circles on the locations of the fault segments in the MTA 2013 Turkey Active Fault map. The change scale is given below the figure)

Şekil 12'de Kuzey kol, 1) Gölcük-Karamürsel-Darıca, 2) Adalar, 3) Çınarcık, 4)Avcılar, 5) Kumburgaz, 6) Tekirdağ, 7) Ganos segmentlerinden oluşmaktadır (MTA 2013). Bu kol üzerinde Adalar segmenti, Tekirdağ ve Ganos segmentlerinin olduğu bölgede P dalgası hız değerlerinin yükseldiği dolayısı ile sıkışmanın arttığı gözlemlenmiştir. Diğer bir yandan Kumburgaz ve Avcılar segmentlerinde hızlarda önemli düşüşler görülmüştür.



Şekil 13. KAFZ orta kolu P- dalga yüzdelik hız değişimi kesiti. Kol üzerinde daire ile numaralandırılan fay parçaları MTA 2013 Türkiye Diri Fay haritası'ndaki fay segmentlerinin yerleridir. Değişim skala şeklinin altında verilmiştir (Cross section of the NAFZ middle arm P-wave percent velocity change. The fault segments numbered with circles on the locations of the fault segments in the MTA 2013 Turkey Active Fault map. The change scale is given below the figure)

Şekil 13'de numaralandırılan 1) İznik Mekece, 2) Gemlik, 3) Zeytinbağı, 4) Bandırma, 5) Edincik, 6) Sinekçi, 7) Biga-Çan segmentleri orta kolu oluşturur (MTA 2013). Bu kol üzerinde ise, Bandırma, Edincik ve Biga-Çan segmentlerinin olduğu bölgelerde hızlar yükselmiştir. Sadece Sinekçi segmentinde P dalgası hızlarının yoğun bir şekilde düştüğü gözlemlenmektedir.



Şekil 14. KAFZ güney kolu P- dalga yüzdelik hız değişimi kesiti. Kol üzerinde daire ile numaralandırılan fay parçaları MTA 2013 Türkiye Diri Fay haritası'ndaki fay segmentlerinin yerleridir. Değişim skala şeklinin altında verilmiştir (Cross section of the NAFZ south branch P-wave percentile velocity change. The fault segments numbered with circles on the locations of the fault segments in the MTA 2013 Turkey Active Fault map. The change scale is given below the figure)

Şekil 14'de güney kol ise 1) İnegöl Bursa, 2) Ulubat, 3) Manyas, 4) Yenice-Gönen, 5) Evciler segmentlerinde oluşmaktadır (MTA 2013). İnegöl-Bursa ve Yenice-Gönen segmentlerinin olduğu yerde P dalgası hızlarının yükseldiği görülmektedir. Manyas segmentinde ise bu iki segmente göre nispeten daha az bir hızlarda artış görülmektedir. Ulubat segmentinde ise bu segmentlerin tam tersi olarak sismik P dalgası hızlarında önemli ölçüde düşüş gözlemlenmiştir. Aynı zamanda Kuzey kolun Kumburgaz, Tekirdağ ve Ganos segmentlerinin bulunduğu bölgenin altından başlayan, Marmara denizini komple kat edip, Güney kola kadar uzanan ve 20 km derinlik civarında sismik hızların düştüğü havza görülmektedir (Şekil 12-13-14).

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Yüze yakın alanlarda heterojeniteye bağlı olarak P dalgası hızlarında kısa mesafelerde değişim görülmektedir. Bu sonuçlar Tunç (2008)'deki sonuçlar ile uyumludur. Gözlemediğimiz P dalgalarının hız yapıları genelde derinlere doğru artış göstermektedir. Ayrıca derinlik kesitlerinden sismik hızların ortalama 28 km'den itibaren en yüksek seviyesine ulaşmaktadır. Bu seviyenin bölgede 28 ile 32 km arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu da Marmara bölgesindeki Moho derinliği yaklaşık olarak bu aralıkta olduğunu göstermektedir. Bu sonuçta önceki çalışmalarda belirlenen Moho derinliği ile uyum içerisindedir. Depremlerin yüzdelik hız değişimlerinin yüksek ve yüksekten düşük değerlere geçiş bölgelerinde kümelendiği gözlemlenmiştir (Şekil 10). Marmara denizi içerisinden geçen Kuzey Anadolu Fay hattı üzerindeki hız değişimlerinin yüksek olduğu Kuzey kol olarak tanımlanan bu hat altı segmentten oluşmaktadır (MTA 2013). Bunlardan Adalar, Tekirdağ ve Ganos segmentlerinde hızların yükseldiği dolayısı ile rijit bir oluşum olduğu buda bu segmentlerdeki hızları arttırdığı tespit edilmiştir. Bu sonuç Gholamrezaie vd. (2019) tarafından yapılan Kuzey Marmara Denizi'nin altında yaklaşık olarak aynı bölgelerdeki dom oluşumu yorumu ile uyumludur denilebilir. Aynı zamanda Bohnhoff vd. (2017)'tarafından yapılan Marmaranın batısının deprem tehlikesi daha fazla olduğunu belirttiği çalışma ile de uyumludur. Orta kolda ise Bandırma, Edincik ve Biga-Çan segmentlerinde hızların yükseldiği tespit edilmiştir. Güney kolda ise hızların önemli derecede arttığı İnegöl-Bursa ve Yenice-Gönen fay segmentlerinde görülmektedir. Bu sonuçlar Barış vd. (2005)'tarafından yapılan Marmaranın doğusundaki hızların arttığı bölgelerle uyumludur. Marmara denizinin altında, Tekirdağ ve Kumburhaz segmentlerinden başlayıp, üç kolu boydan boya kat eden düşük hız havzası (Şekil 12-13-14), nakamura vd. (2002)'tarafından Marmaranın batısında hızların düştüğü alan, Koulakov vd. (2009)'tarafından belirlenen düşük hız bölgeleri ve Barış vd. (2005) tarafından 15 km derinlikten itibaren Marmaranın orta kesimlerinde hızların düştüğünü belirlediği çalışmalar ile uyumludur. Aynı zamanda depremlerin derinlikle değişim grafiğinde 15 ile 25 km arasında hızların düştüğü açıkça görülmektedir (Şekil 11). Sismik Tomografi ile Marmara bölgesinde P hız değerlerinin arttığı ve düştüğü alanlar tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçların çalışma bölgesindeki daha önce yapılan bu çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu araştırma Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi 05546 numaralı ÖYP (Öğretim Elemanı Yetiştirme Programı) projesi tarafından desteklenmiştir. Bu çalışma İbrahim Hakan DEMİRSEKİRAN' in doktora tezinin bir parçasıdır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Akyol, N., Zhu, L. Mitchell, B. J., Sözbilir, H., Kekovalı, K., 2006. Crustal structure and local seismicity in western Anatolia. *Geophys. J. Int.*, 10.1111/j.1365246X.2006.03053.
- Alpar B., Altınok Y., Gazioglu C., Yücel Z.Y. 2002. Tsunami Hazard Assessment in Istanbul. *Journal of Black Sea / Mediterranean Environment*. Issn: 1304-9550.
- Barış, Ş., Ito, A., Üçer, S. B., Honkura, Y., Kafadar, N., Pektaş, R., Komut, T., Işıkar, A. M., 2002. Microearthquake activity before the İzmit Earthquake in the Eastern Marmara Region, Turkey (1 January 1993-17 August 1999). *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 1, pp. 394-405.
- Barış, Ş., Nakajima, J., Hasegawa, A., Honkura, Y., Ito, A., Üçer, S. B., 2005. Three-dimensional structure of Vp, Vs, and Vp/Vs in the upper crust of the Marmara region, NW Turkey. *Earth Planets Space* 57, 1019-1038.
- Bohnhoff M., Dresen G.H., Ceken U., Kadarioglu F.T., Kartal R.F., Kilic T., Nurlu M., Yanik K., Acarel D., Bulut F., Ito H., Johnson W., Malin P.E., Mencin D. 2017. Ganos Fault Zone Network: Imaging North Anatolian Fault Zone In The Western Marmara Region, Turkey, Based On A Dense Local Seismic Network. *Sci. Dril.*, 22, 19-28, 2017. doi:10.5194/sd-22-19-2017
- Çevikbilen, S., Biryol, C. B., Beck, S., Zandt G., Taymaz T., Adıyaman H. E., Özacar A., 2011. 3-D Structure along the North Anatolian Fault Zone in North-Central Anatolia revealed by local earthquake tomography. *Geophys. J. Int.* 2012 188, 819-849.
- Farouk, M., Zhao, D., 2006. Tomo Tools Programme for Windows V 1.0. Geodynamics Research Center (GRC) Ehime University.
- Gholamrezaie E., Scheck-Wenderoth M., Heidbach O. and Strecker M.R. 2019. 3-D crustal density model of the Sea of Marmara. *Solid Earth*, 10, 785-807. DOI:10.5194/se-10-785-2019.
- Horasan, G., Gülen, L., Pınar, A., Kalafat, D., Özel, N., Kuleli, H. S., Işıkar, A. M., 2002. Lithospheric structure of the Marmara and Aegean regions, western Turkey. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 322-329.
- Humphreys, E., Clayton, R. W., 1988. Adaptation of back projection tomography to seismic travel time problems. *J. Geophys. Res.*, 93, 1073-1085.
- Karabulut H., Özalaybey, S., Taymaz, T., Aktar, M., Selvi, O., Kocabeyoğlu, A., 2003. "A tomographic image of the shallow crustal structure in the Eastern Marmara", *Geophysical Research Letters*, 30, 24, 2277.

- Koulakov I., Bindi D., Parolai S., Grosser H., Milkereit C., 2009. Distribution of seismic velocities and attenuation in the crust beneath the North Anatolian Fault (Turkey) from local earthquake tomography, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100 (1), 207-224.
- Maden Tetkik ve Arama (MTA), 2013. Yenilemiş diri fay haritaları. Erişim Tarihi: 03.05.2021.<https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/yenilenmis-diri-fay-haritalari>.
- Nakamura, A., Hasegawa, A., Ito, A., Üçer, B., Barış, Ş., Honkura, Y., Kono, T., Hori, S., Pektaş, R., Komut, T., Çelik, C., Işıkkara, A. M., 2002. P-wave velocity structure of the crust and its relationship to the occurrence of the İzmit, Turkey, earthquake and aftershocks. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92, 330-338.
- Özalaybey, S., Ergin, M., Aktar, M., Tapırdamaz, C., Biçmen, F., Yörük, A., 2002. The 1999 İzmit earthquake sequence in Turkey: seismological and tectonic aspects. *Bull. Seis. Soc. Am.* 92, 376-386.
- Salah, M. K., Zhao, D., 2003. Mapping the crustal thickness in southwest Japan using Moho-reflected waves. *Physics of Earth and Planetary Interiors* 141, 79-94.
- Salah, M. K., Şahin, Ş., Destici, C., 2007. Seismic velocity and Poisson's ratio tomography of the crust beneath southwest Anatolia: an insight into the occurrence of large earthquakes. *J. Seismol.* 11, 415-432, doi: 10.1007/s10950-007-9062-2.
- Soyuer, D., 2012. Marmara bölgesinin kabuk ve hız dağılımının 3-boyutlu sismik tomografi ile incelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi.
- Sengör, A.M.C., 1980, Türkiye'nin neotektoniğinin esasları, Türkiye jeoloji Kurumu, Konferans serisi:2.
- Thurber, C. H., Aki, K., 1987. Three-dimensional seismic imaging, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 15, 115-139.
- Tunç, B., 2008. Marmara Bölgesinin üç- boyutlu hız yapısının Sismik tomografi ile belirlenmesi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kocaeli.
- Zhao, D., Hasegawa, A., Horiuchi, S., 1992. Tomographic imaging of P- and S-wave velocity structure beneath northeastern Japan. *J. Geophys. Res.* 97, 19909-19928.
- Zhao, D., Hasegawa, A., Kanamori, H., 1994. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional and teleseismic events. *J. Geophys. Res.* 99, 22313-22329.
- Zhao, D., 2001. New advances of seismic tomography and its applications to subduction zones and earthquake fault zones: a review. *The Island Arc* 10, 68-84.
- Zhao, D., 2004. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight in to deep Earth dynamics. *Phys. EarthPlanet. Inter.* 146, 3-34.



ASFALT BETON KAPLAMALARINDA TUNÇBİLEK UÇUCU KÜLÜNÜN FİLLER OLARAK KULLANILMASININ ARAŞTIRILMASI

Mohd Ismail TIMORI*, Mesut TİĞDEMİR

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Uçucu Kül, Mineral Filler, Superpave Tasarım Yöntemi, İndirekt Çekme Dayanımı, Tunçbilek Termik Santrali.</i>	<p>Bu çalışmada, atık olarak görülen Kütahya'nın Tavşanlı ilçesinde bulunan Tunçbilek Termik Santralinden çıkan uçucu külün (UK) asfalt betonunda filler malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Öncelikle çalışma için Superpave Tasarım Yöntemi'ne göre gradasyon sınırları içerisinde, agrega oranlarını değiştirerek üç tip agrega gradasyon eğrisi elde edilmiştir. Her gradasyonun optimum bitüm oranını belirlemek için UK filler içerisinde %25, %50, %75, %100 oranlarında kullanılmıştır. Daha sonra belirlenen bitüm yüzdesi kullanılarak Superpave Karışım Tasarım Yöntemine göre numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler AASHTO T283 standardına uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan numunelerin nem hassasiyetinin belirlenmesi için İndirekt Çekme Dayanım (ITS) Deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde UK kullanım ile herhangi bir katkı maddesi kullanılmayan sıcak karışım asfaltlara göre daha yüksek İndirekt Çekme Dayanım Oranı (TSR) elde edilmiştir. Yapılan bu çalışma sonuçlarına göre UK ile hazırlanan Bitümlü sıcak karışımların (BSK) neme karşı direncinin arttığı gözlenmiştir. Dolayısıyla UK ile hazırlanan BSK'ların şiddetli ve uzun süreli yağış alan bölgelerde kullanılmasının daha verimli sonuçlar verebileceği tespit edilmiştir. Ayrıca UK'nın yol üst yapısının, aşınma tabakasında kullanılması, çevresel kirlilikleri önlemekle birlikte ekonomik açıdan da büyük katkılar sağlayacaktır.</p>

INVESTIGATION OF THE USAGE OF TUNÇBİLEK FLY ASH AS FILLERS IN ASPHALT CONCRETE PAVEMENTS

Keywords	Abstract
<i>Fly Ash, Tuncbilek Power Station, Mineral Filler, Indirect Tensile Strength, Superpave Design Method.</i>	<p>In this study, the usability of fly ash (UK) from Tunçbilek Thermal Power Plant in the Tavşanlı district of Kütahya, which is seen as waste, as filler material in asphalt concrete was investigated. First of all, three types of aggregate gradation curves were obtained by changing the aggregate ratios within the gradation limits according to the Superpave Design Method for the study. In order to determine the optimum bitumen ratio of each gradation, 25%, 50%, 75% and 100% were used in UK fillers. Then, the samples were prepared according to the Superpave Mixture Design Method using the determined bitumen percentage. The prepared samples are designed to comply with the AASHTO T283 standard. Indirect Tensile Strength (ITS) test was carried out to check the moisture sensitivity of the designed samples. When the obtained results were examined, a higher Indirect Tensile Strength Ratio (TSR) was obtained with the use of UK compared to the hot mix asphalts without any additives. According to the results of the study, it was observed that the Bituminous hot mixture (BSK) prepared with UK increased the resistance against moisture. Therefore, it has been determined that BSKs prepared with UK can be used in heavy and long-term rainfall areas, giving more efficient results. In addition, the use of UK's road pavement in the wear layer can provide great contributions in terms of economy as well as preventing environmental pollution.</p>

Alıntı / Cite

Timori, M. I., Tığdemir, M. (2022), Asfalt Beton Kaplamalarında Tunçbilek Uçucu Külünün Filler Olarak Kullanılmasının Araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 126-141.

* İlgili yazar / Corresponding author: ismailtimori0@gmail.com

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
M. I. Timori, 0000-0002-1683-7361	Başvuru Tarihi / Submission Date	02.08.2021
M. Tiğdemir, 0000-0002-5303-2722	Revizyon Tarihi / Revision Date	29.09.2021
	Kabul Tarihi / Accepted Date	04.10.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Atıklar genel olarak dünyada çevre ve sağlık açısından aşırı sorunlar ve zararlar ortaya çıkarmaktadırlar. Atıkların en önemli sorunlarından çevrenin normal dengesini bozmak ve çevre kirliliğine neden olmasıdır. Bu çevre kirliliğine neden olan atık ürünlerin miktarı zaman geçtikçe hızlı bir şekilde artış göstermektedir. Dünya nüfusunun artışı ise atıklarının miktarına etki eden en önemli ve belirleyici faktörlerden biri olarak görülmektedir. Atık sorunlarının en büyük kısmı ise ülkemizin özellikle sanayi bölgelerinde meydana gelmektedir. Atık ürünlerin eski seneler olduğu gibi insanların yaşadığı yerlerden uzak bölgelerde toplamaya gerek olmadığı görülmekte, çünkü günümüzde teknolojinin gelişmesiyle beraber atık ürünlerin belirli gruplarda ayıklanarak bertaraf edilmektedir ve aynı zamanda bu atıkların geri dönüşümü mümkün olduğu görülmektedir. Endüstriyel atık ürünlerin değerlendirmek amacıyla son zamanlarda teknolojinin gelişmesiyle beraber ülkemizde birçok araştırmalar ve çalışmalar yapılmıştır. Yapılmış olan bu çalışmalarda, araştırmacıların genel olarak temel amaçları atık ürünlerin hangisini hangi amaç için kullanılabilirliğini belirlemektir (Öntürk ve Vural, 2014). Son yıllarda, gelişmiş ülkelerde de inşaat ve yıkım atıklarının kullanımı konusunda birçok çalışma yapılmıştır. En önemli ilgi, atık malzemelerin yeni inşaat sektörlerinde yeniden kullanılmasıdır. Bilim adamlarının ve araştırmacıların yanı sıra yetkili kişilerin amacı, çevresel ve ekonomik avantajlar için atık malzemelerin geri dönüşümünü ve ayrıca yol yapımında endüstriyel atıkların yeniden kullanım olasılığını araştırmaktır (Xue vd., 2009). Atık malzemelerin yeniden kullanılması, endüstriyel ve kentsel alanlarda aşırı katı atık madde sorununu çözmenin birçok yolundan biridir. Doğal kaynakların aşırı kullanımının azaltılması ve tükenmeden önlem alınması, kentsel ve endüstriyel alanlarda üretilen atık maddelerden çevre kirliliğinin azaltılması, enerji ve para tasarrufuna katkı sağlanması gibi çevreye ve ekonomiye önemli katkılar sağlayabilir. Bu nedenle çevreye olan olumsuz etkilerini azaltmak için bu atık malzemelerin mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda ve ayrıca yol üstü yapısında tekrar kullanılması mantıklıdır (Pourtahmasb ve Karim, 2014). Bu çalışmanın amacı ekonomik bir malzeme kaynağı kullanmak ve aynı zamanda çevre problemi olarak görülen Tunçbilek Termik Santrali'nden elde edilen UK'nın asfalt beton kaplamalarında filler malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır.

2. Kaynak Özetleri (Resources Summaries)

Ali vd. (1996), UK ilave edilen asfalt karışımların mekanik özelliklerini ve asfalt beton kaplamanın performansını iyileştirmede etkisini incelemiştir. Bu çalışmada, %5 bitümlü bağlayıcı ve dört farklı kül içeren, BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin Marshall Stabilite Yöntemiyle elastisite modülü, kalıcı deformasyon, sünme ve yorulma gibi mekanik özellikleri üç farklı sıcaklıkta elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre BSK'larda filler olarak %2 uçucu külün kullanımının, kaplamaların esneklik modülünü yüksek ve düşük sıcaklıklarda iyileştirildiği sonucuna varılmıştır.

Güngör (1996), Afşin Elbistan UK'nın BSK'larda kullanılan kırmataş tozu ve Portland Çimentosu yerine filler olarak kullanılmasının etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada aynı granülometri eğrisine sahip UK, Portland Çimentosu ve taş tozu fillerli numunelerde %4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 6.5 oranlarda bitümlü bağlayıcı kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm yüzdesi Marshall Stabilite Deneyi ve Akma Deneyi yapılarak elde edilmiştir. Elde edilen optimum bitüm yüzdesini kullanılarak Marshall numuneleri hazırlanmış ve plastik deformasyon deneyine tabi tutularak birim deformasyonları elde edilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Deneyi sonuçlarına göre Afşin Elbistan UK'nın BSK'larda taş tozu ve Portland Çimentosu yerine filler olarak kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır.

Terzi, (2000), mermer toz atıklarının BSK'larda kullanılan kırmataş tozu yerine filler olarak kullanılmasının etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada aynı granülometri eğrisine sahip mermer tozu ve taş tozu fillerli numunelerde %3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 ve 6.0 oranlarda asfalt bağlayıcı kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm yüzdesi Marshall Stabilite Deneyi ve Akma Deneyi yapılarak elde edilmiştir. Elde edilen optimum bitüm yüzdesini kullanılarak marshall numuneleri hazırlanmış ve plastik deformasyon deneye tabi tutularak birim deformasyonları elde edilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre mermer tozu atıklarının BSK'larda taş tozu yerine, özellikle mermer tozu bulunduğu bölgelerde, filler olarak kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır.

Yılmaz (2002), Elektrik-ark fırını cüruf ve baca tozlarının esnek yol kaplamalarında kırmataş tozu yerine doğal filler malzemeler yerine kullanılmasının etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada %3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 6.5

oranlarda bitümlü bağlayıcı ve %7.0 endüstriyel atık filler kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm yüzdesi Marshall Stabilite Deneyi ve Akma Deneyi yapılarak elde edilmiştir. Elde edilen optimum bitüm yüzdesini kullanılarak %0, 2.5, 5.0, 7.0, ve %10 oranlarda kırmataş tozu, ferrokrom cürufu ve baca tozu fillerini içeren BSK numuneler hazırlanmış ve üzerine akma ve stabilite deneyleri uygulanarak elden edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre cüruf ve baca tozlarının yol üstü yapısında filler olarak kullanılmasının uygun olmadığı ancak, çok az oranlarda geçirimsizliği ve yoğunluğu artırmak için katkı malzemesi olarak kullanılabilceği bir sakıncası olmadığını sonucuna varılmıştır.

Deniz vd. (2005), eski ve kullanılmış otomobil lastiklerinin BSK'larda kullanılan kırmataş tozu yerine filler malzemesi olarak kullanılmasının etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada atık lastik parçalarının, % 1, 2, % 5 ve 7 oranlarında filler malzemesi olarak kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm içeriği, Marshall Deneyi yapılarak bulunmuştur. Lastik atığı içeren sıcak karışımlarla hazırlanan numuneler üzerine Marshall Stabilite, statik sünme ve dolaylı çekme deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmaların sonuçları incelendiğinde otomobil lastik atıklarının belirli miktarda BSK'larda filler malzemesi olarak kullanılmasının, özellikle soğuk iklimi olan bölgelerde kalıcı deformasyonlara karşı yüksek performans göstereceği sonucuna varılmıştır.

Ceylan (2006), Carboniferous-Triassic kayaç tozunu BSK'larda filler malzemesi olarak kullanılmasının etkisini araştırmıştır. Sonuçları karşılaştırmak amacıyla şahit numune olarak ise kırma taş tozu filler olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada %3.5, 4.0, 4.5, ve 5.0 oranlarında bitümlü bağlayıcı ve %4.0, 6.0, 8.0 endüstriyel atık filler kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm yüzdesi Marshall Stabilite deneyleri ile belirlenmiştir. BSK'larda optimum bitüm oranını kullanılarak hazırlanan numunelerin üzerine Marshall Stabilite-Akma ve dolaylı çekme deneyleri uygulanarak, bu malzemelerin BSK'larda filler malzemesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, Carboniferous-Triassic kayaç tozu BSK'larda kırmataş tozu yerinde filler malzemesi olarak kullanılabilirliği tespit edilmiştir. Hatta biraz daha yüksek değerler elde edildiği söylenebilir. Sonuç olarak Carboniferous-Triassic kayaç tozunun filler malzemesi olarak BSK'larda belirli oranlarda kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Eren (2008), asfaltitin BSK'larda kullanılan kırmataş tozu yerine filler malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu çalışmada taş tozu ve endüstriyel attığı olan asfaltit filler olarak kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm miktarı, Marshall Deneyi yapılarak bulunmuştur. Asfaltit ve kırmataş tozu içeren sıcak karışımlarla hazırlanan numuneler üzerine Marshall Stabilite, su hasar Deneyi ve dolaylı çekme deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında, BSK'larda kırmataş tozu yerine kullanılan asfaltitin, asfalt betonu kaplamalarda, aşınma tabakasında mineral filler olarak belli bir miktarda kullanılmasının daha iyi sonuçlar verebileceği sonucuna varılmıştır.

Ahmedzade vd. (2008), siyah karbonun BSK'larda kullanılan kırmataş tozu yerine filler malzemesi olarak kullanılmasının etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada kırmataş tozu ve siyah karbonun filler malzemesi olarak kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm miktarını Marshall Deneyi yapılarak elde edilmiştir. Aynı agrega gradasyonuna sahip siyah karbon ve kırmataş tozu fillerini içeren sıcak karışımlara hazırlanan numuneler üzerine Marshall Stabilitesi, indirekt çekme rijitlik modülü, sünme sertliği ve indirekt çekme direnci testleri yapılarak elde edilen sonuçları değerlendirilmiştir. Deney Sonuçlarını incelendiğinde, siyah karbonun BSK'larda kırmataş tozu yerinde filler malzemesi olarak kullanılabilirliği tespit edilmiştir.

Üstünkol ve Turabi (2009), mermer tozu, fosfoalçı cam tozu ve UK gibi endüstriyel atıkların asfalt sıcak karışımlarda filler malzemesi yerine kullanılmasının etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada %3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 6.5 oranlarda bitümlü bağlayıcı ve %7.0 endüstriyel atık filler kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm miktarını Marshall Stabilite Deneyi standartlarına uygun bir şekilde %4.9 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bitüm içeriğini ve filler oranlarını değiştirerek Marshall Stabilite Deneyi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında, BSK'larda kırmataş tozu yerine kullanılan endüstriyel atık filler malzemelerin farklı kür şartlarında ve yüksek sıcaklıklarda asfalt betonu kaplamalarda, aşınma tabakasında kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Elmacı (2011), Çimstone Fabrikası'ndan elde edilen kuvars esaslı granit arıtma çamurunun BSK'larda filler malzemesi olarak kullanılmasının etkisini araştırmıştır. %4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 6.5 oranlarda bitümlü bağlayıcı ve %0, 2, 4, 6 ve 8 oranlarda ise filler malzemesi kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm oranı belirlendikten sonra numuneler üzerine Marshall Stabilite, akma ve dolaylı çekme deneyleri uygulanarak bu malzemelerin BSK'larda filler malzemesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde granit arıtma çamurunun yol kaplamalarında aşınma tabakasında, kırmataş tozu yerine filler malzemesi olarak kullanılabilceği tespit edilmiştir.

Öksüz (2011), hurda cam, volkanik cüruf ve cam şişe atıkları BSK'larda geleneksel olarak kullanılan kırmataş tozu yerinde filler malzemesi olarak kullanılmasının etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada granülometri eğrisini sabit tutularak %7 filler oranı ve %4, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 6.5 bitüm oranlarını kullanılarak BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin optimum bitüm yüzdesi Marshall Stabilite deneyleri ile elde edilmiştir. Elde edilen optimum bitüm yüzdesini kullanılarak volkanik cüruf, hurda cam ve cam şişe atıklarının %5.0, 6.0, 7.0, 8.0 ve 9.0 oranıyla üretilen BSK numuneler Marshall stabilite deneylere tabii tutularak bulunan sonuçlar şahit numuneler (kırmataş tozu) ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarını incelendiğinde BSK'larda kullanılan kırmataş tozu yerine filler malzemesi olarak volkanik cüruf, cam şişe ve hurda cam tozunun kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Selman (2015), Bor Atıklarının BSK'larda mineral filler malzemesi olarak kullanılmasının etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada bor atığı ağırlıkça % 4, % 5, % 6, % 7 ve % 8 oranlarında ve sonuçları kıyaslamak için ağırlıkça %6.0 kireç taşı filler olarak kullanılarak, BSK numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerine Marshall Stabilite ve Akma Deneyleri, Dolaylı Çekme-Rijitlik Modülü Deneyi Mekanik Marshall Batırma Deneyleri uygulanarak bor atığı fillerin BSK'larda kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde bor atıklarının yol kaplamalarında aşınma tabakasında kireç taşı tozu yerine filler malzemesi olarak %5,7 oranında kullanılabilirdiğinin sonucuna varılmıştır.

Mistry ve Roy (2016), UK'nın Asfalt sıcak karışımlarında ortak dolgu maddesi yerine kullanılmasının etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada kontrol amacıyla %2 hidrasyonlu kireç (HL) ve alternatif olarak %2 ile %8 arasında değişen UK yüzdesi ve %3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 6.5 oranlarda bitüm içeriği kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Marshall Karışım Tasarımı ile tüm karışımlar için Optimum bitüm miktarı belirlenmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında %4 UK ya sahip karışım için, daha düşük optimum bitüm miktar ile daha yüksek stabilite değeri gösterilmiştir. Bu nedenle bu çalışma, standart şartnameyi karşılayarak asfalt beton karışımlarında HL yerine alternatif dolgu maddesi olarak UK % 4 oranında kullanılabilir sonucuna varılmıştır.

(Bohara ve Tamrakar, 2018), UK'nın asfalt betonunda olası kullanımının yanı sıra farklı UK içeriğinin Marshall özellikleri ve optimum bitüm miktarının üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada değişken bitüm içerikli dört UK içeriği %3, %5, %7, %9 kullanılarak ve %5 çimento içerikli karışımı ve %6 bağlayıcı içerikli agregaya göre dolgu maddesi olarak %5 taş tozu içeren karışımı ile karşılaştırılmıştır. Karışım tasarımı dolgu içeriğinin dikkate alınması çok önemlidir çünkü farklı dolgu içeriklerinde asfalt beton karışımları farklı davranır. Deney sonuçlarını değerlendirildiğinde %3 UK içeren karışım haracında, akış değeri, Marshall Stabilitesi ve Marshall oranı açısından tüm UK içeren karışımlar kontrol karışımlarından (çimento ve taş tozu) daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. %6.3 optimum bitüm miktarı ile %7 UK içeriğinde, asfalt beton karışımı daha iyi davranır ve dolgu olarak çimento ile karıştırmaya kıyasla ekonomik olarak da uygundur. Bu nedenle çalışma, ekonomik olarak uygun karışımı yani %7 UK içeriğini önermektedir.

(Hossain vd. (2018), Genel olarak taş tozunun kullanıldığı bitümlü kaplama karışımlarında mineral dolgu olarak UK'nın çeşitli koşullar altında kullanma olasılığını incelenmişlerdir. Bu çalışmada Marshall Karışım Tasarım Yöntemi ile numunelerin optimum bitüm miktarları belirlenmiştir. Asfalt karışımlarında UK'nın mineral dolgu yerine %25, 50, 75 ve 100 oranlarda ikame olarak kullanılarak, asfalt karışımları hazırlanmıştır. Belirlenen optimum bitüm miktarı ve UK içeriği sabitlenerek, sıkıştırılmış karışımların 5, 10, 15 ve 20 gün süreyle suya batırılmış ve etkisini gözlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde toplam dolgu ağırlığına göre %25 UK ve %75 taş tozunun orta trafik koşulu için karışım tasarım kriterlerini karşıladığı bulunmuştur. Bu nedenle optimum olarak toplam dolgu ağırlığına göre %25 UK kullanılabilir. Ayrıca bu karışım orta trafik koşullarında taşkın düzlükleri için uygun olduğu görülmüştür.

Mirkoviç vd. (2019), UK'nın asfaltta kullanılma olasılığı hakkında daha genel bir sonuç elde etmek için, önemli ölçüde farklı kimyasal bileşime sahip üç tip UK'nın asfalt karışımlarının özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada asfalt karışımlarında UK'nın mineral dolgu yerine %25, 50, 75 ve 100 oranlarda ikame olarak kullanılarak, asfalt numuneleri hazırlanmıştır. Sonuçları değerlendirmek için kullanılan kontrol numuneleri ise, %100 mineral dolgu kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin Marshall Stabilite Yöntemiyle hacimsel bileşimini, stabilitesini, akmasını, su hassasiyetini ve kalıcı deformasyona karşı direnci elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmanın sonucunda, UK'nın asfalt karışımlarda daha geniş bir şekilde uygulanması sonucuna varılmıştır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada materyal olarak, mineral agregalar, mineral filler ve bitüm kullanılmıştır.

3.1.1. Mineral agregalar (Mineral Aggregate)

Bu çalışmada, Isparta Belediyesi Asfalt Şantiyesinden elde edilen kırmataş, mineral agrega olarak kullanılmıştır. Kullanılan iri ve ince agreganın özgül ağırlıklarını belirlemek için yapılmış olan deneyler ve sonuçları Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. İri ve ince agrega özellikleri (Coarse and fine aggregate specifications)

Özellik	Değer	Standart
İri agrega hacim özgül ağırlığı	2.661	ASTM C 127-88
İri agrega zahiri özgül ağırlığı	2.692	ASTM C 127-88
İri agrega su emme oranı (%)	%0,682	ASTM C 127-88
İnce agrega hacim özgül ağırlığı	2.558	ASTM C 128-88
İnce agrega zahiri özgül ağırlığı	2.642	ASTM C 128-88
İnce agrega su emme oranı (%)	%2.05	ASTM C 128-88

3.1.2. Mineral Filler (Mineral Fillers)

Mineral filler doğal olarak bulunan veya üretilen ve agregalara eklenen ince daneli mineral parçacıklar olup ve asfalt karışımlarının performansında önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada kırmataş tozu ve uçucu kül mineral filler olarak kullanılmıştır.

3.1.3. Kırmataş tozu (Crushed Stone Powder)

Bu çalışmada, deney sonuçlarını karşılaştırmak için, şahit olarak kullanılan kırmataş tozu malzemesi Isparta Belediyesi Asfalt Şantiyesinden temin edilen mineral agregalarının 200 nolu elekten elenmesi sonucundan elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan kırmataş tozunu Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada filler olarak kullanılan kırmataş tozu (Crushed stone powder used as filler in the study)

3.1.4. Uçucu Kül (Fly Ash)

Bu çalışmada, kullanılan uçucu kül Kütahya'nın Tavşanlı İlçesi'nde bulunan Tunçbilek Termik Santrali'nden temin edilmiş olup Süleyman Demirel Üniversitesi Ulaştırma Anabilim Dalı Laboratuvarı'nda 200 nolu elekten elenerek mineral filler malzemesi içerisinde sıra ile %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kullanılmıştır. Çalışmada filler olarak kullanılan UK Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada filler olarak kullanılan Uçucu Kül (Fly Ash used as filler in the study)

3.1.5. Bitüm (Bitumen)

Çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan bitüm Isparta İli Belediye Fen İşleri Müdürlüğünden temin edilmiştir. Bitümün penetrasyon derecesi 50-70' olarak bulunmuştur.

3.2. Yöntem (Method)

3.2.1. Superpave Karışım Tasarım Yöntemi (Superpave Mix Design Method)

Esnek kaplamaların performansı, asfalt betonunun kalitesinden büyük ölçüde etkilenmektedir. Dünya'daki karayolları genellikle, tipik olarak en az 20 yıl sürecek şekilde tasarlanarak inşa edilmektedir ancak beklenen süreçten daha önce asfalt kaplamalarda çatlak, tekerlek izi ve delikler görünmeye başlamakla beraber kısa kaplama ömrü ile kötü performans göstermesi anlamına gelmektedir. Ticari araçlar açısından yüksek trafik yoğunluğu, kamyonların ciddi şekilde aşırı yüklenmesi ve kaplamanın günlük ve mevsimsel sıcaklıklarındaki önemli farklılıklar, asfalt kaplamalarda bu sorunların erken gelişmesinden sorumlu olarak görülmektedir. Dünyada genel olarak asfalt beton kaplamaların tasarımında Triaxial, Marshall, Hubbard Field, Hveem ve Superpave karışım tasarım yöntemleri gibi çeşitli asfalt karışım tasarım yöntemleri uygulanmaktadır. Dünyada çok yaygın olarak kullanılan Marshall Tasarım Yöntemi asfalt kaplamalarında gelişen erken bozulmalara katkıda bulunan nedenlerden biridir. Türkiye'de çok yağın olarak kullanılan Marshall Tasarım Yönteminin temel sorunu, asfalt karışımlarının gerçek saha koşullarını simüle etmeden deneysel laboratuvar prosedürlerine dayalı olarak tasarlanmasıdır ve bu de belirli bir karışımın sahada nasıl bir performans göstereceğini doğru bir şekilde tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır (Zumrawi ve Sheikh Edrees, 2016). Superpave Karışım Tasarım Yöntemi ise bu ihtiyacı karşılamak ve oluşan bu sorunları ortadan kaldırmak için geliştirilmiş bir tasarım yöntemidir. Uygun asfalt karışımını tasarlamak için bu yöntem, asfalt karışımının laboratuvar ve saha performansı arasında doğrudan bir ilişki kurulmasına izin veren performansla ilgili kriterlere dayanmaktadır. Bu yöntem Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) faaliyet gösteren Strategic Highway Research Program (SHRP) tarafından geliştirilmiştir. SHRP, 1987 yılında ABD'deki yolların performansını ve durabilitesini artırmak ve yol kullanıcıları için daha güvenli hale getirmek için 150 milyon dolar karşılığında tam beş yıl içinde kurulmuştur. Harcanan bu 150 milyon dolarından 50 milyon dolarını laboratuvarda yapılan deneyler ve şartname çalışmaları için harcanmıştır. Geri kalan 100 milyondan bir deneme yolu yapılarak kaplama tabakasının davranışını incelenmiştir. Bu araştırma programının neticesinde Superpave Karışım Tasarım yöntemi geliştirilmiştir (SHRP, 1994). Karayollarında kullanılan Superpave Karışım Tasarımı yöntemi ile Marshall tasarım yöntemini karşılaştırdığında Superpave tasarım yönteminin çalışma alanının performansı Marshall Tasarım Yöntemi'nden daha uygun ve gerçeğe çok yakın olduğunu görülmektedir. Marshall Yöntemi'nde sıkıştırma işlemi bir darbeli tokmak ile deney numunesinin her iki tarafına belli bir sayıda vurmalı bir şekilde uygulanmakta olup, mevcut olan deney numunesinin yük altındaki plastik akması ve stabilitesi ise Marshall deney aletinin yardımıyla yapılarak belirlenmektedir. Ancak bu sıkıştırma işlemi Superpave Tasarım Yöntemi'nde ise yoğurmalı sıkıştırıcı vasıtasıyla yapılmaktadır. Asfalt sıcak karışımının belirli devir sayısı, yoğurma açısı ve basınç gibi şartlar altında yoğurma işlemine tabi tutularak numuneyi saha şartlarına en yakın bir şekilde sıkıştırmaktadır. Marshall tasarım yönteminde yapılan sıkıştırma işlemi darbeli tokmak ile yapılırken, arazide ise çelikten oluşan silindirler yardımıyla yapılan sıkıştırma işlemi tam olarak temsil edilmemektedir. Sıkıştırma işlemi darbeli tokmak vasıtasıyla yapılarak agrega danelerin kırılmasına, optimum bitüm oranı ve boşluk oranının doğru bir şekilde saptanmamasına neden olabilmektedir. Dolayısıyla bu şekilde tasarlanan asfalt kaplamalarında zamanla çatlaklar ve farklı bozulmalar ortaya çıkmaktadır. Superpave tasarım yönteminde yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları ve sabit deformasyonlara karşı kaplama direncini bulmak için kayma deneyi ve dolaylı çekme deneyi gibi performans deneylerinden detaylı veriler elde edildikten sonra kaplama performansı değerlendirilmektedir. Böylece Superpave Tasarım Yöntemi, sıkıştırılmış karışımın performans deneyleri ile performansını değerlendirilmesi ve belli iklim ve yükleme şartları altında sıkışmayı

doğrudan temsil etmesinden dolayı Marshall tasarım yönteminden daha mükemmel üstün olarak değerlendirilmektedir (Altaş, 2002).

3.2.1.1. Gradasyon (Gradation)

Superpave Karışım Tasarım Yöntemine göre agrega gradasyonunu belirlemek için, nominal maksimum tane boyutu 12.5 mm olan agrega gradasyonu tercih edilmiştir. Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı yardım ile hazırlanmış olan karışımlar üç farklı sıkıştırma parametreye ($N_{başlangıç}$, $N_{tasarım}$, $N_{maksimum}$) göre tasarlanmaktadır. Kara yolların trafik seviyelerine göre sıkıştırma parametreleri Tablo 2 'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Trafik seviyesine göre sıkıştırma parametreleri (Compression parameters by traffic level)

Tasarım (ESALs) (Miyon)	Sıkıştırma Parametreleri		
	$N_{baş}$	$N_{tasarım}$	N_{maks}
< 0.3	6	50	75
0.3 - 30	7	75	115
3 - 30	8	100	160
≥ 30	9	125	205

Isparta ilindeki asfalt kaplamaların hizmet vereceği 20 yıllık trafik tasarım değeri, $3 \cdot 10^7$ ESALs' den daha büyük olduğunu tespit edilmiştir. Dolayısıyla çalışmada hazırlanmış olan asfalt sıcak karışımların $N_{tasarım}$ değeri 125 olarak alınmıştır. Çalışmada toplam üç tip agrega gradasyonu kullanılmıştır. Kullanılan bu agrega gradasyonların eğrileri Tablo 3'te gösterilen Karayolları Genel Müdürlüğü'nün Teknik Şartnamesi'nde (2013) belirtilen aşınma Tabakası sınırlarına uygun bir şekilde seçilmiştir.

Tablo 3. Aşınma tabakasında kullanılan agrega gradasyon sınır değerleri
(Aggregate gradation limits used in the wear layer)

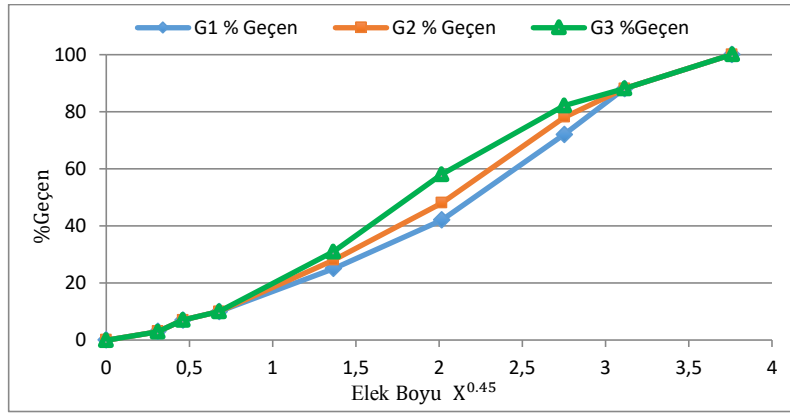
Elek Boyu mm (inç, No)	TİP -1 Geçen %	TİP -2 Geçen %	TİP -3 Çok İnce Aşınma
19 (3/4")	100	-	-
12.5 (1/2")	88 - 100	100	100
9.5 (3/8")	72 - 90	80 - 100	90 - 100
6.0 (1/4")	-	-	25 - 33
4.75 (No.4)	42 - 52	55 - 72	23 - 31
2.00 (No.10)	25 - 35	36 - 53	20 - 27
0.425 (No.40)	10 - 20	16 - 28	12 - 18
0.180 (No.80)	7 - 14	8 - 16	-
0.075 (No.200)	3 - 8	4 - 8	7 -11

Çalışmada kullanılan üç tip agrega gradasyonun yüzde geçen ve karışım miktarları Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Çalışmada kullanılan gradasyonlar (gradations used in the study)

Elek No	1.Gradasyon		2.Gradasyon		3.Gradasyon	
	% Geçen	Karışım miktarı (gr)	% Geçen	Karışım miktarı (gr)	% Geçen	Karışım miktarı (gr)
19	100	0	100	0	100	0
12.5	88	144	88	144	88	144
9.5	72	192	78	120	82	72
4.75	42	360	48	360	58	288
2	25	204	28	240	31	324
0.425	10	180	10	216	10	252
0.18	7	36	7	36	7	36
0.075	3	48	3	48	3	48
Filler	0	36	0	36	0	36

Kullanılan agrega gradasyonlar Tablo 3'te gösterilen sınır değerleri çerçevesinde deneyler yapılarak bulunmuştur. Tablo 4'te elde edilen üç tip agrega gradasyonunun yüzde geçen değerlerini ve agrega miktarlarını kullanarak Excel program ile gradasyonların eğrileri çizilmiş ve Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Agrega gradasyonları (Aggregate gradation curves)

3.2.1.2. Superpave tasarım yöntemi ile numunelerin hazırlanması (Preparation of samples with the Superpave design method)

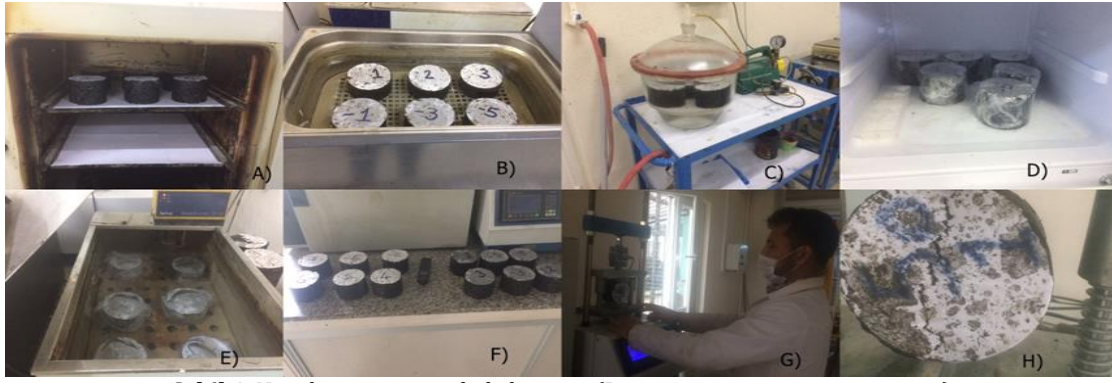
Superpave Tasarım Yönteminde deney numuneleri hazırlamak için öncelikle, belirtilen agrega gradasyonu kullanılarak 1200 gr'lık agrega karışımları hazırlanır. Hazırlanan agrega karışımları 110 °C' gelene kadar etüve bekletilir. Mineral filler yerinde, sıra ile %25, %50, %75 ve %100 olarak UK kullanılmıştır. Deneye başlamadan önce Superpave cihazı kalıbını 1.5 ile 2 saat arasında etüve konularak sıcaklığının 150-160 °C'ye gelmesi beklenir. Deneyde bağlayıcı olarak kullanılan bitümü de etüve koyarak akışkan hale gelmesi beklenir. Daha sonra belirtilen bitüm oranlara göre agrega karışıma sıcak bitüm eklenerek ısı eşliğinde karıştırılır. Karıştırma işlemi bitümün agrega ile tamamen kaplamasına kadar ve agregalarda herhangi beyaz nokta görülmeğe kadar devam edilir. Daha sonra karıştırılan sıcak karışımını Superpave kalıbının içine yerleştirilerek ve Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı ile sıkıştırma işlemi yapılmaktadır. Numunelerin hazırlanmasındaki aşamaları Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Superpave Yoğurmalı Sıkıştırıcı ile numunelerin hazırlanması (Preparation of samples with Superpave kneading compactor)

3.2.1.3. Nem hassasiyeti (Moisture Susceptibility)

Superpave Karışım Tasarımındaki son adım, tasarım karışımının nem hassasiyetini değerlendirmektir. BSK'ların nem hassasiyeti, asfalt karışımın su ile temas halindeki hasara karşı direnci olarak tanımlanır, nem asfalt karışımında nüfuz edilerek agrega ile asfalt bağlayıcı arasındaki adezyonun zayıflatabilir. Asfalt karışımlarda nem hassasiyetini değerlendirmek için AASHTO T283 standartlarından yararlanmaktadır. Testi gerçekleştirmek üzere, hazırlanmış numuneleri 72 saat boyunca 40 °C' lik etüve bekletilir. 72 saat sonra çıkarılan numunelerin kuru ağırlığı ve üç ayrı noktadan yükseklik ve çapı ölçülür. Daha sonra numuneler üç şartlandırılmamış (kuru) ve üç şartlandırılmış (Islak) olmak üzere iki eşit gruba ayrılır. Üç adet numune 25 °C lik etüve soğumaya bırakılır. Diğer üç adet numune de şartlandırmak amacıyla 24 saat boyunca 25 °C lik su banyosunda bekletilir. 24 saat sonunda su banyosundan çıkarılan numunelerin doygunluk oranı %55 ile %80 arasına gelinceye kadar vakum işlemine tabi tutulur. Daha sonra numuneleri streç film ile sarılıp -18 °C lik kabinde 16 saat boyunca bekletilir. 16 saat sonra numuneler 60 °C lik su banyosuna yerleştirilir ve 24 saat bekletilir. 24 saat sonra 60 °C lik su banyosundan çıkarılan numuneler 2 saat boyunca 25 °C lik su banyosuna yerleştirilir. İki saat sonra su banyosundan çıkarılan şartlandırılmış numuneler ile etüveden çıkarılan kuru numunelerin üzerine İndirekt Çekme Dayanım (ITS) testi gerçekleştirilir. Tüm test aşamalarının adımları Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Nem hassasiyetinin belirlenmesi (Determining moisture sensitivity)

Yukarıdaki şekilde;

- A) Numunelerin 72 saat 40 °C etüvde bekletilmesi,
- B) Şartlandırılmış numunelerin 24 saat 25 °C sıcaklıkta su banyosuna bırakılması,
- C) Numunelerin %55-80 doygunluk derecesine ulaşmak için vakum işlemi gerçekleştirilmesi,
- D) Numunenin 16 saat boyunca dondurucuya bekletilmesi,
- E) Dondurucudan çıkarılan numunelerin 60 °C su banyosunda 24 saat boyunca bekletilmesi,
- F) Kuru ve şartlandırılmış Numunelerin 25 dereceye gelmesi,
- G) Numunenin dayanımını bulmak için numuneyi İndirekt Çekme cihazına yerleştirilmesi,
- H) Ve son olarak numunenin kırılması.

ITS'nin değerini elde etmek için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi * T * D} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde;

- ITS: İndirekt çekme dayanımı (KPa),
- P: Kırılma anında uygulanmış maksimum yük (KN),
- T: Numunenin kalınlığı (m)
- D: Numunenin çapı (m).

Numuneleri neme karşı hassasiyetini belirlemek için şartlandırılmış numunelerin çekme dayanımlarının ortalamasının, şartlandırılmamış numunelerin dayanımlarının ortalamasına oranı belirlenir. Belirlenen bu oran, çekme dayanım oranı ya kısacası TSR olarak adlandırılır ve aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$TSR = \frac{ITS_{Islak}}{ITS_{Kuru}} \times 100 \quad (2)$$

Burada;

- TSR: İndirekt çekme dayanım oranı (%),
- ITS_{Islak}: şartlandırılmış numunelerin indirekt çekme dayanımı (KPa),
- ITS_{Kuru}: şartlandırılmamış numunelerin indirekt çekme dayanımı (KPa).

4. Araştırma bulguları ve Tartışma (Research Findings and Discussion)

Çalışmada öncelikle Superpave Tasarım Yöntemine göre üç tip agrega gradasyonu belirlenmiştir. Belirlenen bu gradasyonları kullanarak %25, %50, %75, %100 oranlarda agrega karışımında UK ilave edilerek Superpave Tasarım Yöntemine bağlı kalınarak optimum bitüm oranı belirlenmiştir. Optimum bitüm oranlarına bağlı olarak da her oran için karışım hazırlanılarak Superpave yağurmalı sıkıştırıcı ile sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Hazırlanan numunelerin neme karşı hassasiyetini belirlenmek için AASHTO T-283'e göre numunelerin üzerinde indirekt çekme dayanım (ITS) testi uygulanmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışmada yapılan tüm deneyleri ve elde edilen tüm sonuçları bu bölümde verilmiştir.

4.1. Optimum Bitüm Miktarının Belirlenmesi (Determining the Optimum Binder Content)

Superpave Karışım Tasarım Yönteminde optimum bitüm miktarlarını belirlemek için farklı bitüm içeriği ile hazırlanan karışımların yağurmalı sıkıştırıcı ile sıkıştırıldıktan sonra elde edilen numunelere ait pratik özgül

ağırlık, VFA, VMA ve %4 hava boşluğun grafiklerin çizilmesi gerekmektedir. Çalışmada optimum bitüm miktarlarını belirlemek için Tablo 5'te gösterilen VMA sınır değerleri ve Tablo 6'da gösterilen VFA sınır değerleri ve ayrıca %4 hava boşluğunu kriterini dikkate alınmıştır.

Tablo 5. Nominal maksimum agrega boyutuna göre VMA değerleri (VMA values based on nominal maximum aggregate size)

Nominal Maksimum Agregaya Boyutu	Minimum VMA (%)
9.5 mm	15
12.5 mm	14
19 mm	13
25 mm	12
37.5 mm	11

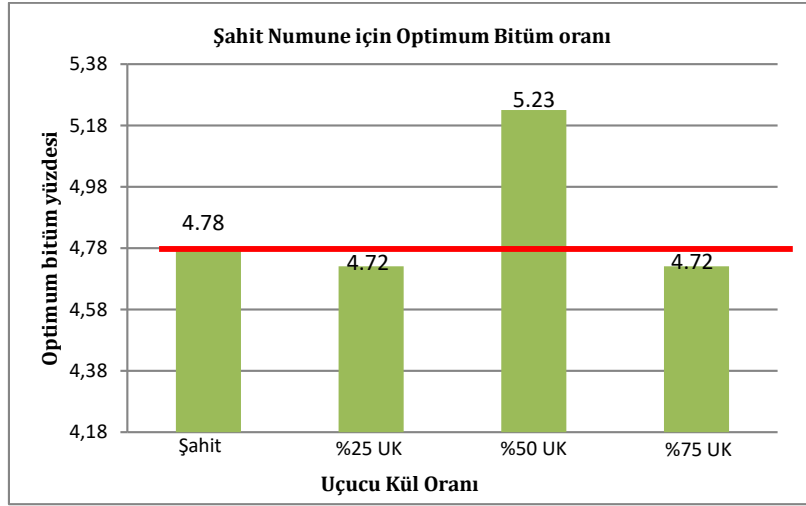
Tablo 5'te gösterdiği gibi çalışmada nominal maksimum agrega boyutu 12.5 mm olarak tercih edilmesinden dolayı minimum VMA değeri %14 olarak kullanılmıştır.

Tablo 6. Trafik seviyesine göre VFA sınır değerleri (VFA limit values according to traffic level)

Tasarım ESALs (Milyon)	Tasarım VFA (%)
< 0.3	70 - 80
0.3 - 3	65 - 78
3 - 10	65 - 75
10 - 30	65 - 75
≥ 30	65 - 75

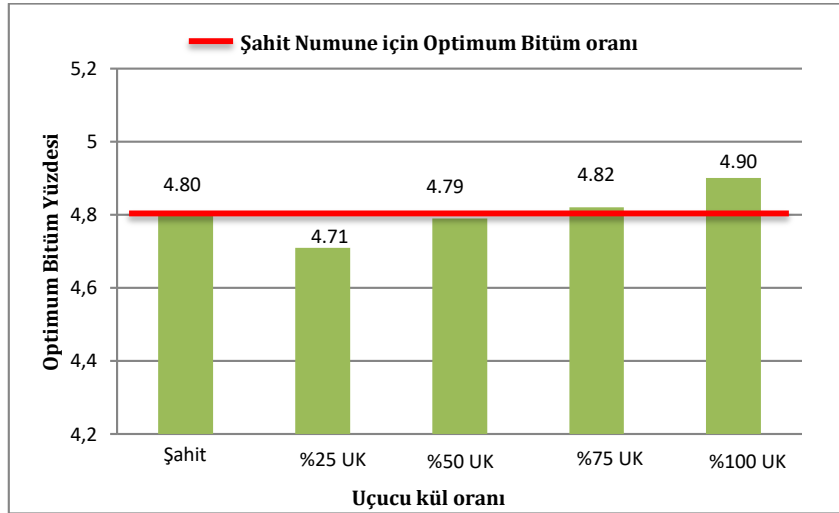
Tablo 6'da gösterdiği gibi Isparta ilindeki asfalt kaplamaların hizmet vereceği 20 yıllık trafik tasarım değeri, $3 \cdot 10^7$ ESALs' den daha büyük olduğu için VFA sınır değerleri 65 ile 75 arasında seçilmiştir.

Bitümlü karışımların optimum bitüm miktarının belirlenmesi için toplam üç agrega gradasyonu kullanılmıştır. Kullanılan bu gradasyonlarda filler malzemesi yerine sırasıyla %25, 50, 75, 100 oranında UK kullanılmıştır. Her oran için dört adet agrega karışım gradasyonu hazırlanarak %4 hava boşluğuna göre %4, 4,5, 5, 5,5, 6 ve 6.5 oranlarda bitüm ilave edilmiştir. 1200 gr'lık agrega karışım gradasyonu hazırlanarak sıcak bitüm ile karıştırılır. Bitümün agregaları tamamen kaplayabilmesi için sıcaklık sabit bir ortamda bir ısıtıcı üzerinde elle karıştırma işlemi yapılmıştır. Bu işleme başlamadan önce Superpave cihazının sıkıştırma kalıbı ve hazırlanmış olan 1200 gr'lık agrega karışım gradasyonu 110 °C ve bitüm ise 135 °C de etüvde ısıtılmıştır. Karıştırma işlemi bittikten sonra asfalt karışımını yoğurmalı sıkıştırıcı kalıbına dikkatli bir şekilde yerleştirerek Tablo 7'de gösterilen 125 tasarım yoğurma sayısına göre sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işleminden çıkan sonuçlara göre hava boşluğu, özgül ağırlık, VMA ve VFA değerleri bulunmuş ve grafikleri çizilmiştir. İlk önce hava boşluğu grafiğinde gösterilen %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm yüzdesi belirlenmiştir. Daha sonra belirlenmiş olan bu bitüm oranı VMA grafiğinde minimum %14 değerini ve VFA grafiğinde %65-75 sınır değerlerin içerisinde olup olmadığı kontrol edilmiştir. Kontrol edilen tüm şartlar sağlandıktan sonra %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm yüzdesi değeri optimum bitüm yüzdesi olarak kabul edilmiştir. Superpave Tasarım Yönteminde optimum bitüm miktarının belirlemek için her UK oranından 4'er adet olmak üzere toplam 60 adet numune hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan üç tip gradasyondan her biri için optimum bitüm miktarları bulunmuştur. Her gradasyon için birer şahit numune ve %25, %50, %75 ve %100 oranlarında UK kullanılmak üzere toplam 15 optimum bitüm oranının değeri elde edilmiştir. Elde edilen tüm optimum bitüm yüzdesi değerlerine ait grafikler ve açıklamaları sırasıyla Şekil 6, 7 ve 8'de verilmiştir.



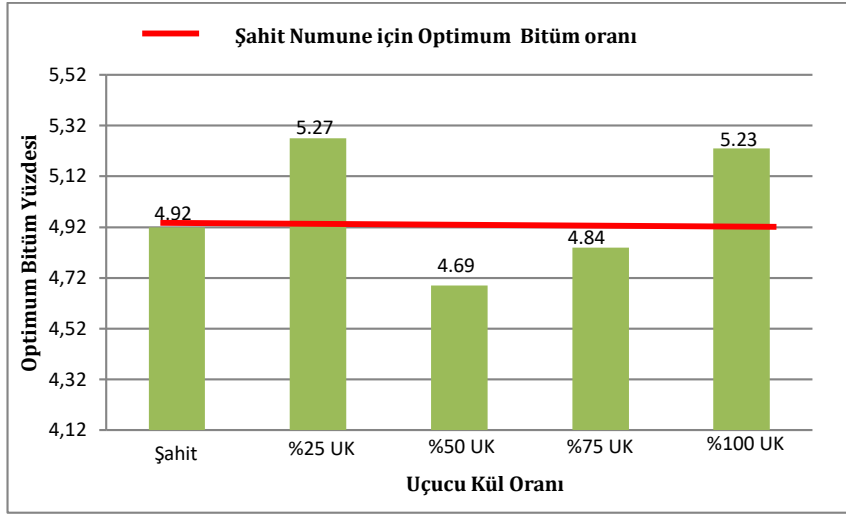
Şekil 6. UK oranına göre 1. gradasyon optimum bitüm oranları (1st gradation optimum bitumen ratios according to UK ratio)

Şekil 6' da görüldüğü gibi birinci gradasyonun şahit numunesinin optimum bitüm miktarı %4.78 olarak bulunmuştur. %25 UK ve %75 UK için optimum bitüm miktarları şahit numuneden daha düşük yani %4.72 olarak bulunmuştur. Optimum bitüm değerinin azalması maliyetin azalması demektir. %50 UK için optimum bitüm miktarı ise şahit numuneden daha fazla, %5.23 olarak, bulunmuştur. Bu da optimum bitüm miktarının arttığına göstergesidir. Optimum bitüm miktarının artması ile doğal olarak maliyet açısından da bir miktar artış meydana gelecektir. Kısacası birinci gradasyonda %25 ve %50 oranlarda UK kullanımı ile optimum bitüm miktarında bir azalma sağlanmıştır.



Şekil 7. UK oranına göre 2. gradasyon optimum bitüm oranları (2st gradation optimum bitumen ratios according to UK ratio)

Şekil 7'de görüldüğü gibi ikinci gradasyonun şahit numunesinin optimum bitüm miktarı %4.80 olarak elde edilmiştir. %25 ve %50 oranlarında UK kullanımı ile optimum bitüm miktarları şahit numunenin optimum bitüm miktarından daha az bir değer verdiği görülmektedir. Optimum bitümün azalması maliyetin azalması demektir ki bu de istenen bir durumdur. %75 ve %100 UK kullanımı ile optimum bitüm miktarının şahit numuneden daha fazla bir optimum bitüm değeri verdiği görülmektedir. Bitüm miktarının artması maliyetin artması demektir. Kısacası şekil 4.20'de görüldüğü gibi UK'nın artması ile optimum bitüm miktarında da bir miktar artış görülmektedir.



Şekil 8. UK oranına göre 3. gradasyon optimum bitüm oranları
(3st gradation optimum bitumen ratios according to UK ratio)

Şekil 8’de görüldüğü gibi üçüncü gradasyonun şahit numunesinin optimum bitüm miktarı %4.92 olarak gösterilmektedir. %50 ve %75 oranlarda UK kullanımı ile optimum bitüm miktarları şahit numunenin optimum bitüm miktarından daha az bir değer verdiği görülmektedir. Optimum bitüm miktarının azalması, maliyetin azalması demektir ki bu de istenen bir durumdur. %25 ve %100 UK kullanımı ile optimum bitüm miktarının şahit numuneden daha fazla bir optimum bitüm değeri verilmesini görülmektedir. Bitüm miktarının artması maliyetin artması demektir. Sonuç olarak üçüncü gradasyonda %50 UK kullanımı ile en düşük optimum bitümü elde ederken %25 UK kullanılarak en yüksek optimum elde edilmiştir.

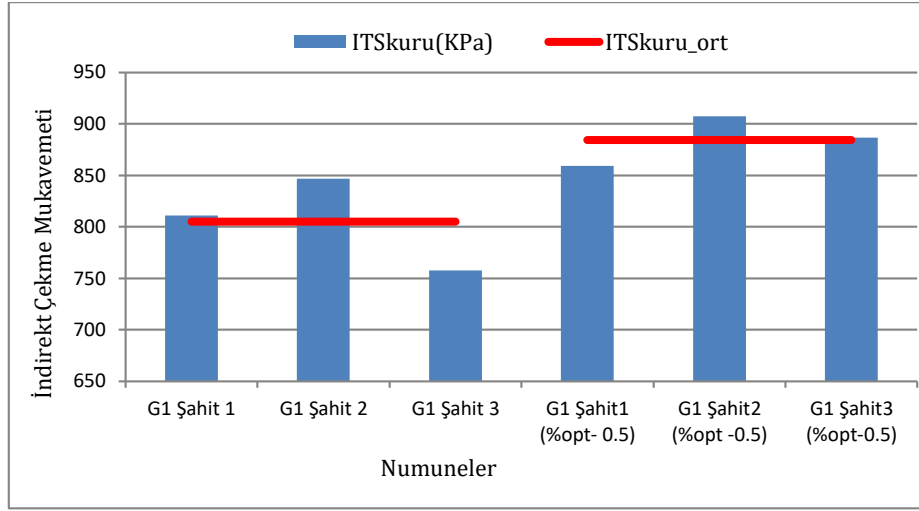
4.2. İndirekt Çekme Dayanımı (ITS) deney sonuçları (Indirect Tensile Strength (ITS) test results)

Superpave Karışım Tasarım Yönteminde son olarak optimum bitüm oranına göre hazırlanan numunelerin üzerine AASHTO T-283’e göre ITS testi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tüm gradasyonlar için elde edilen 14 adet optimum bitüm miktarından dayanım için sadece 8 numune kullanılmıştır. Kullanılan bu 8 adet numuneden üç numunedeki optimum yüzdesi %0.5 azaltılarak kullanılmıştır. Çünkü optimum bitüm oranının azalması durumunda maliyette bir miktar düşüş meydana gelmektedir. ITS deneyi gerçekleştirilmeden önce elde edilen optimum bitüm oranına göre hazırlanan sıcak karışımlar Superpave yoğurmalı sıkıştırıcı ile sıkıştırılmıştır. UK içeren karışımlarla hazırlanan numuneler ve şahit numuneler de dahil olmak üzere, şartlandırılmış ve şartlandırılmamış numunelerin her birinden üçer adet numune olacak şekilde toplam 48 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 40°C’lik etüvde 72 saat süre ile bekletilmiştir. Sürenin sonunda etüvden çıkarılan numunelerin üç farklı noktasından yükseklikleri kumpas yardımı ile ölçülmüş ve kuru ağırlıkları da tartılıp kaydedilmiştir. Şartlandırılacak olan numunelerin her birinden üç adet olmak üzere toplam 24 adet numune 25°C’lik su banyosuna yerleştirilmiştir. Geriye kalan 24 adet numuneyi de şartlandıracak numuneler ile aynı zamanda test edilmek üzere 25°C’lik etüvde bekletilmiştir. 24 saatin sonunda su banyosunda bekletilen numunelerin, %55-80 doymuluk oranına ulaşması için vakum işlemine tabii tutulmuştur. Sonra numunelerin sudaki ağırlıkları ve yüzey kuru suya doymuş ağırlıkları ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Vakum işleminden sonra her bir numunenin yüzeyi hava almayacak şekilde su geçirmez streç yardımıyla kapatılmış ve numuneler 16 saatliğine - 18°C sıcaklıktaki dondurucuya yerleştirilmiştir. 16 saatin sonunda dondurucudan alınan numuneleri 60 °C’deki su banyosunda 24 saat süreyle bekletilmiştir. 60 °C’deki su banyosunda çıkarılan numuneleri 2 saat süre ile 25°C’lik su banyosuna yerleştirilmiştir. Bu sürenin sonunda şartlandırılmış ve şartlandırılmamış numunelerin tümünün 25°C’ye gelmeleri beklenmiştir. 25°C’ye gelen tüm numuneler ITS testine tabii tutulmuş ve şartlandırılmamış ITS_{kuru} şartlandırılmış ITS_{Islak} değerleri bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 7’de gösterilmiştir.

Tablo 7. İndirekt çekme deney sonuçları (Indirect tensile strength test results)

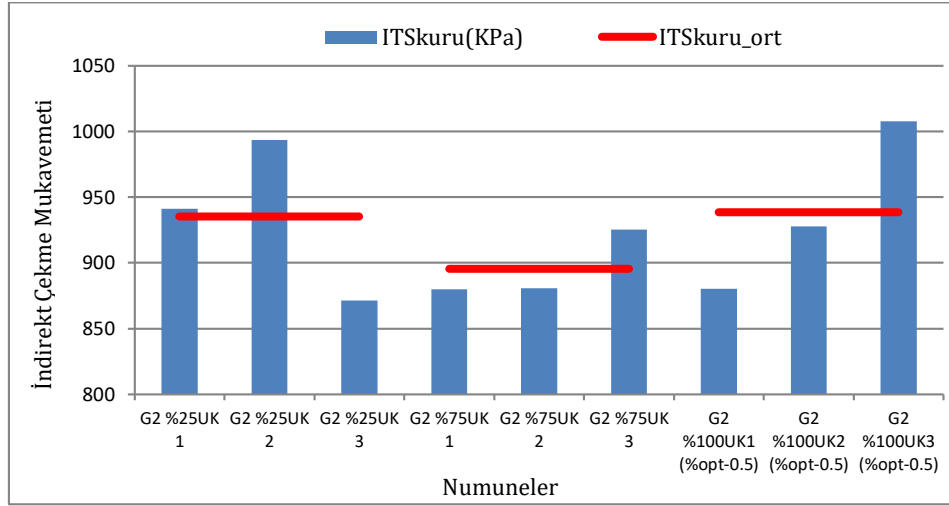
Numune Adı	İndirekt Kuru (kN)	Kuru İndirekt Çekme Muk. ITS _{kuru}	İndirekt Islak (kN)	Islak İndirekt Çekme Muk. ITS _{Islak}
G1 Şahit	9.37	846.52	8.72	791.54
G1 Şahit-0.5	9.64	884.34	9.39	860.69
G2 %25 UK	10.27	935.33	8.57	780.46
G2 %75 UK	9.64	879.65	9.29	840.48
G2 %100 UK- 0.5	10.21	927.67	12.88	1170.27
G3 %25 UK	8.18	729.43	7.97	711.84
G3 %50 UK-0.5	10.71	984.19	10.57	969.53
G3 %100 UK	9.16	821.68	8.74	791.92

Deneyleerde dayanım için hazırlanan toplam 48 numunenin yarısı şartlandırılmış şekilde, diğer yarısı ise şartlandırılmamış şekilde yani ITS_{kuru} deney sonuçları aşağıda grafikler halinde verilmiştir.



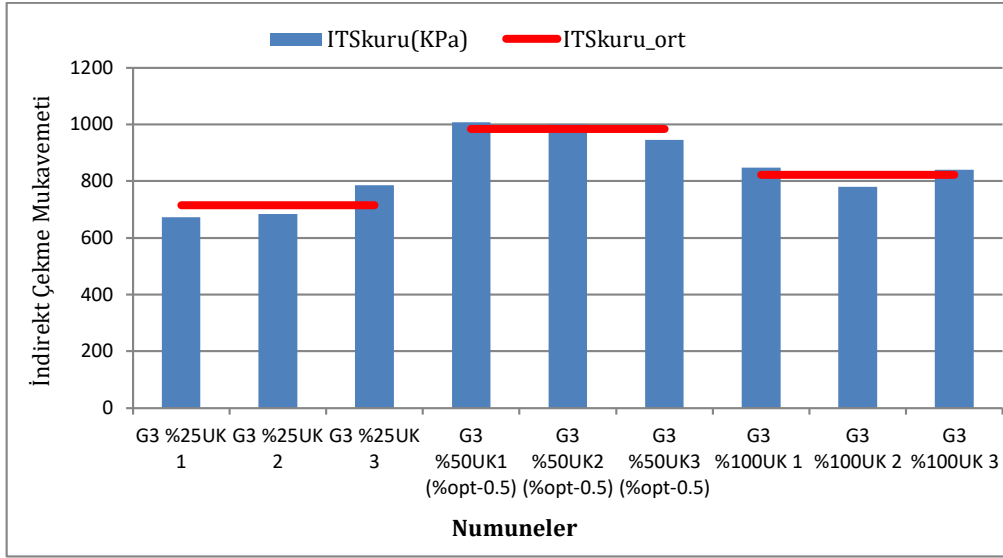
Şekil 9. Birinci gradasyon karışımlarına ait benzer numuneler için ITS_{kuru} değerleri (ITS_{dry} values for similar samples of first gradation mixes)

Şekil 9'da 1.gradasyon için yapılan ITS_{kuru} deney sonuçların grafik hali görülmektedir. Bu gradasyonda UK kullanılmamak üzere sadece filler olarak kırmataş tozu kullanılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi ilk üç numunede optimum bitüm oranını kullanarak dayanımların ortalaması 805.05KPa olarak bulunmuş ve diğer üç numunede (G1 Şahit opt-0.5) optimum bitüm yüzdesinden %0.5 azaltılarak dayanımların ortalaması 884.34KPa olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu dayanımlara göre bu gradasyon için optimum bitüm yüzdesinin %0.5 azaltılmış durumunda numunelerin şartlandırılmamış halindeki dayanımında bir miktar artış gözlenmektedir. Sonuç olarak bu gradasyonda bitüm miktarının azaltılması durumunda dayanımında bir miktar artış görülürken, maliyetinde de bir miktar düşüş olacağı tespit edilmiştir.



Şekil 10. İkinci gradasyon karışımlarına ait benzer numuneler için ITS_{kuru} değerleri (ITS_{dry} values for similar samples of second gradation mixtures)

Şekil 10'da 2.gradasyonun için yapılan ITS_{kuru} deney sonuçların grafik hali görülmektedir. Bu gradasyonda şekilde görüldüğü gibi %25, %75 ve %100 oranlarda UK kullanılarak her oran için UK'nın etkisi incelenmiştir. %25 oranında UK kullanılmamış her üç numunenin şartlandırılmamış halindeki dayanım ortalamasının değeri 935,33KPa olarak elde edilmiştir. %75 oranında UK kullanımında her üç numunenin şartlandırılmamış halindeki dayanım ortalamasının değeri 895.33KPa olarak elde edilmiştir. %100 UK kullanımında ise her üç numunenin şartlandırılmamış halindeki dayanım ortalamasının değeri 938.66KPa olarak elde edilmiştir. Sonuçları incelendiğinde %100 UK kullanıldığı durumda ve elde edilen optimum bitüm yüzdesi da %0.5 azaltılarak bu gradasyon için en yüksek dayanım ortalamasını veren numune olarak görülmektedir. Bu gradasyon için %75 oranında UK kullanılması durumunda ise diğer kullanılmış oranlara göre en düşük dayanım ortalamasını verdiği görülmektedir. Sonuç olarak bu gradasyon için numunelerin şartlandırılmamış halinde, optimum bitüm miktarının azaltılarak ve UK oranını da artırarak verimli sonuçlar elde edileceği tespit edilmiştir.



Şekil 11. Üçüncü gradasyon karışımlarına ait benzer numuneler için ITS_{kuru} değerleri (ITS_{dry} values for similar samples of third gradation mixtures)

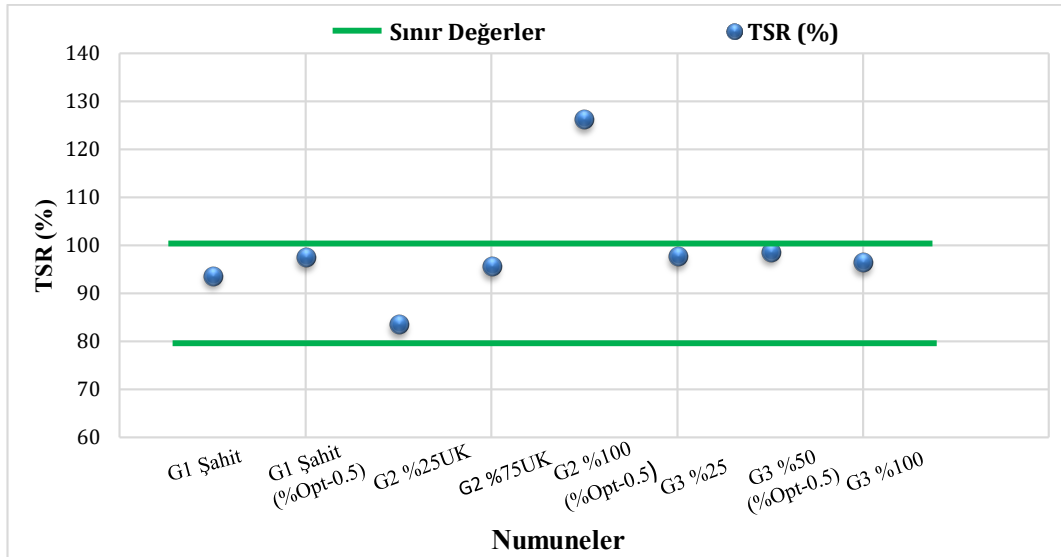
Şekil 11'de 3. gradasyon için yapılan ITS_{kuru} deney sonuçlarının grafik hali görülmektedir. Bu gradasyonda şekilde görüldüğü gibi %25, %50 ve %100 oranlarda UK kullanılarak her oran için UK'nın etkisini incelenmiştir. %25 oranında UK kullanımında her üç numunenin şartlandırılmamış halindeki dayanım ortalamasının değeri 714,48KPa olarak elde edilmiştir. %50 oranında UK kullanımında her üç numunenin şartlandırılmamış halindeki dayanım ortalamasının değeri 984.19KPa olarak elde edilmiştir. %100 UK kullanımında ise her üç numunenin şartlandırılmamış halindeki dayanım ortalamasının değeri 821.68KPa olarak elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde %50 UK kullanıldığı durumda ve elde edilen optimum bitüm miktarını da %0.5 oranında azaltılarak bu gradasyon için en yüksek dayanımı veren numune olarak görülmektedir. Bu gradasyon için %100 oranında UK kullanılması durumunda %25 UK kullanıldığı numunelerden daha düşük bir dayanım ortalaması vermiştir ve bu da UK'nın oranının artışından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak bu gradasyon için numunelerin şartlandırılmamış halinde, optimum bitüm miktarının azaltılarak ve UK oranını da artırarak verimli sonuçlar elde edileceği tespit edilmiştir.

Tüm numunelerin neme karşı hassasiyetini değerlendirmek için şartlandırılmış numunelerin ITS_{ıslak} değerlerini şartlandırılmamış numunelerin ITS_{kuru} değerlerine bölünerek TSR oranlar elde edilmiş ve sonuçları Tablo 8' de gösterilmiştir.

Tablo 8. Karışımların TSR oranları (TSR ratios of mixtures)

Numune Adı	TSR (%)
G1Şahit	93.50
G1şahit (%opt-0.5)	97.33
G2 %25 UK	83.44
G2 %75 UK	95.55
G2 %100 UK (%opt-0.5)	126.15
G3 %25 UK	97.59
G3 50% UK (%opt-0.5)	98.51
G3 %100 UK	96.38

Tablo 8'de görüldüğü gibi tüm numunelerin TSR oranları şartnamedeki minimum %80 minimum sınır değerini sağlamaktadır. TSR oranların %80 değerinden ne kadar fazla olursa o kadar da neme karşı direnç te doğal olarak artmış olmaktadır. Tablo 8'e bakıldığında genel olarak bir numune (G2 %25 UK) hariç diğer tüm numunelerin TSR oranları %100'e çok yakın olduğu görülmektedir. Dolayısıyla UK'nın agrega karışımında filler olarak kullanılmasının numunelerin neme karşı performansını arttırdığı gözlenmiştir. Tüm numunelerin neme karşı hassasiyetini değerlendirmek için Tablo 8'in TSR sonuçlarına göre bir dağılım grafiği çizilmiş ve aşağıdaki Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Karışımların TSR oranları (TSR ratios of mixtures)

Şekil 12’de görüldüğü gibi 1. gradasyonun şahit numunesinin optimum bitüm miktarının %0.5 birim azaltılmış durumunda neme karşı performansı daha da artmıştır. Buna göre bu gradasyon için bitümün azalması durumunda numunelerin neme karşı performansı daha da artmaktadır. İkinci gradasyondaki %25 ve %75 UK kullanım durumunda yaklaşık aynı optimum bitüm miktarlarına sahip ama %75 UK’nın kullanılması durumunda TSR oranı daha fazla olduğu görülmektedir. %25 UK’nın kullanılması durumunda ise diğer numunelere göre en düşük TSR oranını vermiş görülmektedir. İkinci gradasyonun %100 UK kullanılması durumunda optimum bitüm miktarı %25 ve %75 oranlardan daha düşük olduğuna rağmen ama UK oranı fazla olduğu için tüm numunelere göre en büyük TSR oranını vermiştir. Buna göre bu gradasyonun TSR oranlarına bakıldığında UK’nın arttığı durumda TSR oranları artmıştır. Yani UK’nın numunelerin neme karşı performansını arttırmıştır. 3. gradasyondaki üç numunenin TSR oranlarına bakıldığında çok yakın değerler verdiği görülmektedir. Ancak %50 UK kullanımında bitüm miktarı diğer %25 ve %100 UK kullanımından daha az olduğuna rağmen neme karşı performansı daha fazla olduğu görülmektedir. Genel olarak tüm numunelerin TSR oranların sonuçlarına bakıldığında UK’nın artmasıyla numunelerin neme karşı performansı artmıştır.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Çalışmada, bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak geleneksel kullanımı olan kırmataş tozu yerine %25, %50, %75 ve %100 UK kullanılmıştır. İlk etapta çalışma için üç tip agrega gradasyonu belirlenmiştir. Belirlenen bu agrega gradasyonları kullanılarak her gradasyon için optimum bitüm oranları elde edilmiştir. Elde edilen optimum bitüm oranlarına göre Superpave hacimsel karışım tasarım yöntemine göre numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerine ITS testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üretilen numunelerin nem hassasiyeti de incelenmiştir. Yapılan deney sonucunda bitümlü karışımlarda taştözü yerine UK’nın kullanılmasında optimum bitüm miktarını düşürerek maliyet açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Ayrıca elde edilen sonuçlara göre UK kullanımı ile çalışmada, herhangi bir katkı maddesi kullanılmayan sıcak karışım asfaltlara göre daha yüksek TSR oranları elde edilmiştir. TSR oranların artması ile numunelerin neme karşı direnci artmış demektir. BSK’lı kaplamaların neme ve şiddetli yağışlara çok uzun zaman maruz kalması istenmemektedir. Ancak ülkemizde bilhassa Karadeniz bölgesinde şiddetli ve uzun süreli yağışların BSK’lı kaplamalarında bozulmalara neden olduğu bilinmektedir. Yapılan çalışma sonuçlarına göre UK ile hazırlanan BSK’ların neme karşı performansların artırdığı gözlenmiştir. Dolayısıyla UK ile hazırlanan BSK’ların şiddetli ve uzun süreli yağış alanlarda kullanılabilmesi daha verimli sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Atık yöntemi ve atıkların çevreye ve insan sağlığına verilen zararların, günümüzdeki en ciddi sorunlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Atık olarak görülen UK’nın Türkiye’de bulunan termik santrallerden yılda 16 milyon ton ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada UK’nın BSK’larda agrega karışımı içerisinde filler olarak kullanılabilmesi görülmüştür. Sonuç olarak UK’nın yol üstü yapısının, aşınma tabakasında kullanılması, çevresel kirlilikleri önlemekle birlikte ekonomik açıdan da büyük katkılar sağlayabilmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Ahmedzade, P., Alataş, T., Geçkil, T. 2008. Asfalt betonunda siyah karbonun filler olarak kullanımı. *Teknik Dergi*, 19(4), 4493–4507.
- Ali, N., Chan, J. S., Simms, S., Bushman, R., Bergan, A. T. 1996. Mechanistic Evaluation Of Fly Ash Asphalt Concrete Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8(1), 19–25.
- Altaş, Ö. Yi. 2002. Bitümlü malzemeler ve karışım şartnamelerinin karşılaştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 137s, İstanbul.
- Bohara, N., Tamrakar, G. B. S. 2018. Study of the Influence of Fly Ash and Its Content in Marshall Properties of Asphalt Concrete. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 3(3), 261–270.
- Ceylan, S. 2006. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Filler Olarak Carboniferous-Triassic Kayaç Tozlarının Kullanılması Ve Etkisi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 79s, Konya.
- Deniz, M. T., Sönmez, İ., Yıldırım, S. A., Eren, B. K. 2005. Kullanılmış otomobil lastiklerinin bitümlü sıcak karışım performansına etkisi. 6. Ulaştırma Kongresi, İstanbul, 349–364.
- Elmacı, A. 2011. Asfalt Betonunda Granit Arıtma Çamurunun Filler Malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. In *Phys. Rev. E*. Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 75s, Afyon.
- Eren, Ü. 2008. Asfaltitin asfalt betonunda mineral filler olarak kullanılması. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74s, Trabzon.
- Güngör, M. M. 1996. Afşin Elbistan uçucu külünün esnek yol kaplamalarında filler olarak kullanımı üzerine bir araştırma. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 65s, Elazığ.
- Hossain, A., Khan, T., Ahmed, J. 2018. Influence of Fly Ash as Mineral Filler in Bituminous Mix Design. *Trends in Civil Engineering and Its Architecture*, 3(2), 1–6.
- Mirkoviç, K., Tosiç, N., Mladenoviç, G. 2019. Effect of Different Types of Fly Ash on Properties of Asphalt Mixtures. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 12.
- Mistry, R., Roy, T. K. 2016. Effect of using fly ash as alternative filler in hot mix asphalt. *Perspectives in Science*, 8, 307–309.
- Öksüz, B. 2011. Asfalt Betonuna Kaplamalarda Volkanik Cüruf ve Cam Atıklarının Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 77s, İsparta.
- Öntürk, K., Vural, İ. 2014. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılabilirliğinin Arştırılması. *Akademik Platform*, 1275–1284.
- Pourtahmasb, M. S., Karim, M. R. 2014. Performance evaluation of stone mastic asphalt and hot mix asphalt mixtures containing recycled concrete aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.
- Selman, G. Ş. 2015. Bor atıklarının asfalt kaplamalarda mineral filler olarak kullanılabilirliği Koca Tepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 84s, Afyon.
- Terzi, S. 2000. Mermer Toz Atıkların Asfalt Betonunda Filler Malzemesi Olarak Kullanılmasının Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 62s, İsparta.
- Üstümkol, F. N., Turabi, A. 2009. Endüstriyel Atıkların Karayolu Üstyapısında Değerlendirilmesi. *BAÜ FBE Dergisi*, 11(1), 15–27.
- Xue, Y., Hou, H., Zhu, S., Zha, J. 2009. Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environmental impact. *Construction and Building Materials*, 23(2), 989–996.
- Yılmaz, A. 2002. Antalya Ferrokrom İşletmesi'nin elektrik-ark fırını cüruflarının ve baca tozu atıklarının asfalt betonunda kullanılabilirliğinin araştırılması. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 76s, Antalya.
- Zumrawi, M. M. E., Sheikh Edrees, S. A. 2016. Comparison of Marshall and Superpave Asphalt Design Methods for Sudan Pavement Mixes. *International Journal of Scientific and Technical Advancements*, 2(1), 29–35.



AN INVESTIGATION ON EDGE DETECTION OF STRUCTURES AND DEPTH ESTIMATION OF ISPARTA ANGLE REGION (SOUTHWEST TURKEY) USING AEROMAGNETIC DATA

Ezgi ERBEK KIRAN*

Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Geophysical Engineering, Isparta, Turkey

Keywords

*Isparta Angle,
Analytic Signal,
Tilt Angle Derivative,
Aeromagnetic Data.*

Abstract

This paper aims to delineate the subsurface structures and their depths located in the Isparta Angle region (SW Turkey) through the aeromagnetic data. The dataset has been processed via the well-known mathematical tools such as spectral analysis and derivative methods. First, to separate these anomalies from each other, the spectral analysis has been completed and high anomaly regions have been determined around Isparta city. This could be attributed to the fact that these values might be stem from magnetic bodies (like volcanic cones, caldera) located in the Golcuk volcanic region. In addition, the average depths of deep and shallow causative bodies have been calculated to be 6.72 km and 0.31 km, respectively. Secondly, to delineate the exact location and the depth to top of the sources, analytic signal transformation and tilt method have been applied to the residual anomalies. The maps show six regions which have the high magnetization values and these anomalies have been investigated in detail to delineate the upper depths of subsurface structures. Especially, the study showed that Golcuk volcanic occurrences, which are one of the crucial structures in the region, have a deeper root (around 3.47 km) and larger lying magnetic bodies underneath the surface.

ISPARTA AÇI BÖLGESİ (GÜNEYBATI TÜRKİYE) YAPILARIN SINIR TESPİTİ VE DERİNLİK TAHMİNİ ÜZERİNE HAVA MANYETİK VERİLERLE BİR ARAŞTIRMA

Anahtar Kelimeler

*Isparta Açısı,
Analitik Sinyal,
Tilt Açısı Türevi,
Havadan Manyetik Veri.*

Öz

Bu makale, Isparta Açı bölgesinde (GB Türkiye) yer alan yeraltı yapılarını ve derinliklerini aeromanyetik veriler aracılığıyla tanımlamayı amaçlamaktadır. Veri seti, spektral analiz ve türev yöntemleri gibi iyi bilinen matematiksel araçlar aracılığıyla işlenmiştir. Öncelikle bu anomalileri birbirinden ayırmak için spektral analiz uygulanmış ve Isparta ili çevresinde yüksek anomalili bölgeler belirlenmiştir. Bu durum, bu değerlerin Gölçük volkanik bölgesinde yer alan manyetik cisimlerden (volkanik koniler, kaldera gibi) kaynaklanıyor olabileceğine bağlanabilir. Ayrıca derin ve sığ kaynaklı cisimlerin ortalama derinlikleri sırasıyla 6,72 km ve 0,31 km olarak hesaplanmıştır. İkinci olarak, kaynakların tam yerini ve en üst noktaya kadar olan derinliğini belirlemek için rezidüel anomalilere analitik sinyal dönüşümü ve tilt yöntemi uygulanmıştır. Haritalar, yüksek manyetizasyon değerlerine sahip altı bölgeyi göstermiştir ve bu anomaliler, yeraltı yapılarının üst derinliklerini betimlemek için ayrıntılı olarak incelenmiştir. Özellikle çalışma, bölgedeki önemli yapılardan biri olan Gölçük volkanik oluşumlarının daha derin bir köke (yaklaşık 3.47 km) ve yüzeyin altında daha büyük manyetik kütlelere sahip olduğunu göstermiştir.

Alıntı / Cite

Erbek Kiran, E., (2022). An Investigation on Edge Detection of Structures and Depth Estimation of Isparta Angle Region (Southwest Turkey) Using Aeromagnetic Data, Journal of Engineering Sciences and Design 10(1), 142-151.

* Corresponding author / İlgili yazar: ezgierbek@sdu.edu.tr, +90-246-211-1368

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
E. Erbek Kiran, 0000-0003-4627-8932	Başvuru Tarihi / Submission Date	11.09.2021
	Revizyon Tarihi / Revision Date	16.10.2021
	Kabul Tarihi / Accepted Date	21.10.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Introduction

The magnetic method provides insight into a wide scale of the examination of alteration in magnetization, the definition near-surface volcanic rocks, the determination of the subsurface and surface, the recognition of the position of faults/contacts. It is based on the Earth's magnetic field and the variation in the magnetization of geological units. However, the analysis and interpretation of the magnetic method are much more complex due to the dipolar nature of the magnetic field and body magnetizations. Therefore, to cope with this issue, remarkable efforts have been conducted in the literature. To this end, various analysis techniques of the potential field data that aim to determine the subsurface structures and tectonic properties have been proposed. Reduce to pole (RTP) correction, for instance, was first developed by Baranov (1957) and later extended by Ansari and Alamdar (2009). Horizontal gradient of the potential field is the most popular method purposed by Cordell and Grauch (1985). On the other hand, Nabighian (1972, 1984) and Roest et al. (1992) showed that 2-D and 3-D analytic signal method is very useful to delineate the true boundaries of the causative sources. The other fundamental techniques are tilt angle derivative methods presented by Miller and Singh (1994) and total horizontal derivative of the tilt angle (Verduzco et al., 2004).

In this study, Isparta Angle, which is bounded by Fethiye-Burdur Fault Zone (FBFZ), Afyon-Aksehir Fault Zone (AAFZ), and Cyprus Arc in the SW Anatolia, Turkey, was selected as a study area. It is an intersection region between the Hellenic arc and Cyprus arc. Exploring of the Isparta Angle region and its tectonic implications have great importance due to region current property. Although many studies have been carried out in the literature such as those of Barka et al., 1995; Yagmurlu et al., 1997; Glover and Robertson 1998; Dolmaz et al., 2003; Dolmaz, 2007; Beyhan and Keskinsezer, 2016; Oksum et al., 2019, the region is still a matter of debate. Thus, this paper aims to delineate the structural trends and causative sources by utilizing some of the aforementioned techniques. Besides that, the results obtained from the analysis and interpretation of aeromagnetic data will be discussed in terms of geological and tectonic background.

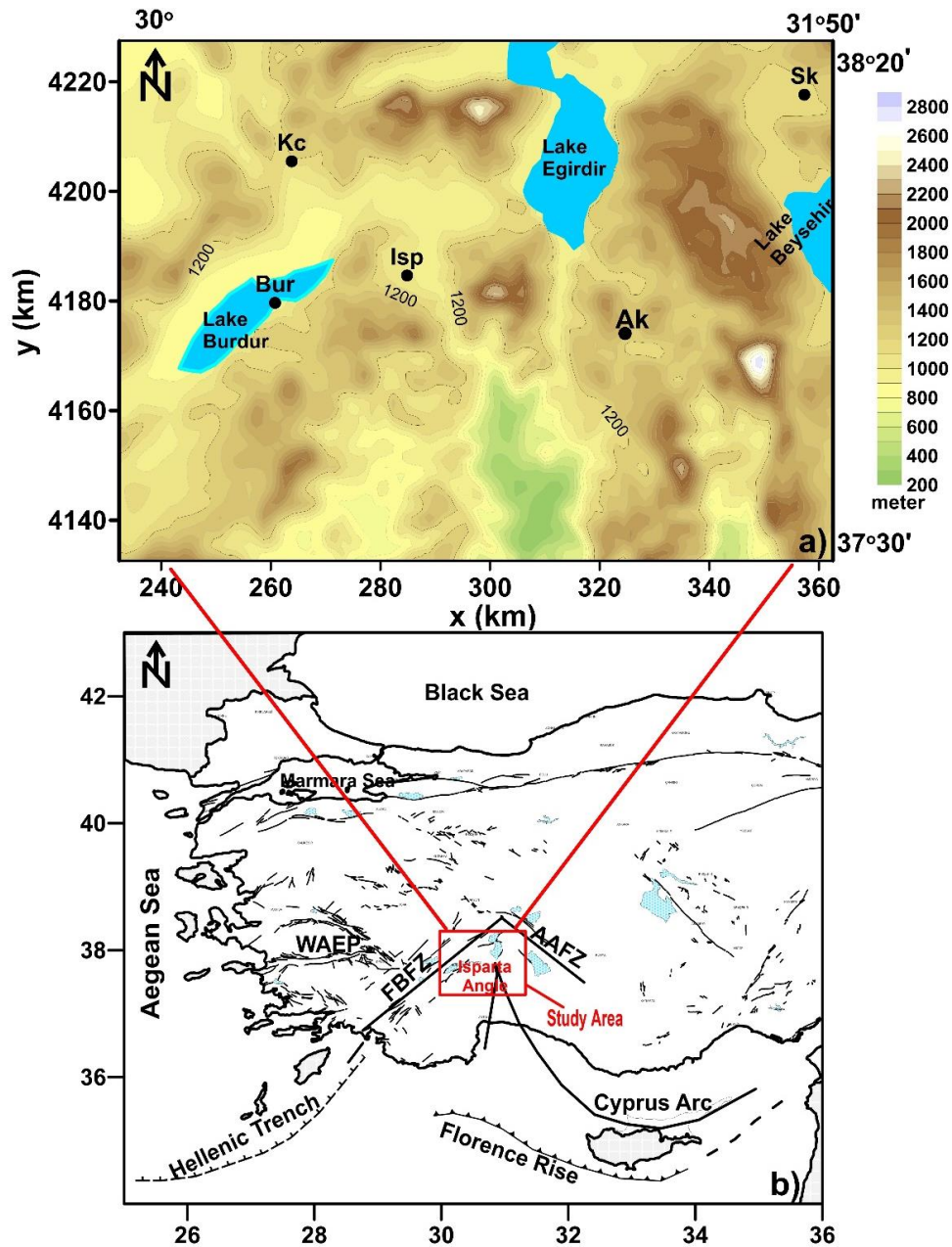


Figure 1. (a) Topography (elevation) map of the study area; (b) Simplified tectonic map of the Isparta Angle region. FBFZ: Fethiye-Burdur fault zone, AAFZ: Afyon-Aksehir fault zone, WAEP: Western Anatolian Extensional Province.

2. Geological Settings

The Isparta region located at the intersection of the Cyprus and Hellenic arc is a triangular-shaped region. It shares the boundary with the FBFZ at the west and the AAFZ at the east. Hence, the region has a complex geological and tectonically background and it has been gathering attention ever since Penck (1918) first explored. He investigated the Paleogene stratigraphy and the main tectonic lineaments of the region (Poisson et al., 2003). In other respects, Isparta Angle is one of the most important and active tectonic structures in the Tauric belt and it is characterized by major extensional fault lineaments. This phenomenon is related with subduction zone located between African and Eurasia in the Mediterranean Sea. Isparta Angle suture zone with the trending N-S right-lateral faults separates the Western Anatolian Extensional Province (WAEP) from Anatolia Plateau (Glower and Robertson, 1998; Dolmaz, 2007). Robertson et al. (1996) pointed out that the Isparta Angle was formed by the clockwise rotation of the western side and counter-clockwise rotation of the eastern side during the Neotectonic period while Poisson et al. (2003) indicated that the Isparta Angle was resulted from the Tertiary closure of the Pamphylian Basin located to the south of the Taurus belt. In addition, it is divided into two parts (i.e., the western and the eastern limbs) by Egirdir-Kovada graben formed during the Triassic-Upper Cretaceous and the Early Paleocene (Fig. 2). The western part is characterized by NE-trending fault system while the eastern part is represented with the NW-trending fault system (Cengiz et al., 2006).

In terms of geological units, autochthonous and allochthonous rock units from the Paleozoic to Quaternary dominate in the southwestern part of Turkey (Dolmaz et al., 2018). The allochthonous sheets are gathered below three headers; Lycian nappes, Antalya nappes and Beyşehir-Hoyran-Hadim nappes. The Lycian nappes situated at W and NW of the Isparta Angle is composite unit while the Antalya nappes consist of the ophiolites and the deep basal sequences. Also, Beyşehir-Hoyran-Hadim nappes includes carbonate platform units, basal series and ophiolites (Monod, 1977; Poisson et al., 2003). Besides these, active volcanism products including Golcuk volcanics, andesite, trachyandesite, rocks of tuff, tuffite and pumice were formed during the Quaternary (Elitok et al., 2010). All those reveal the importance of the study area.

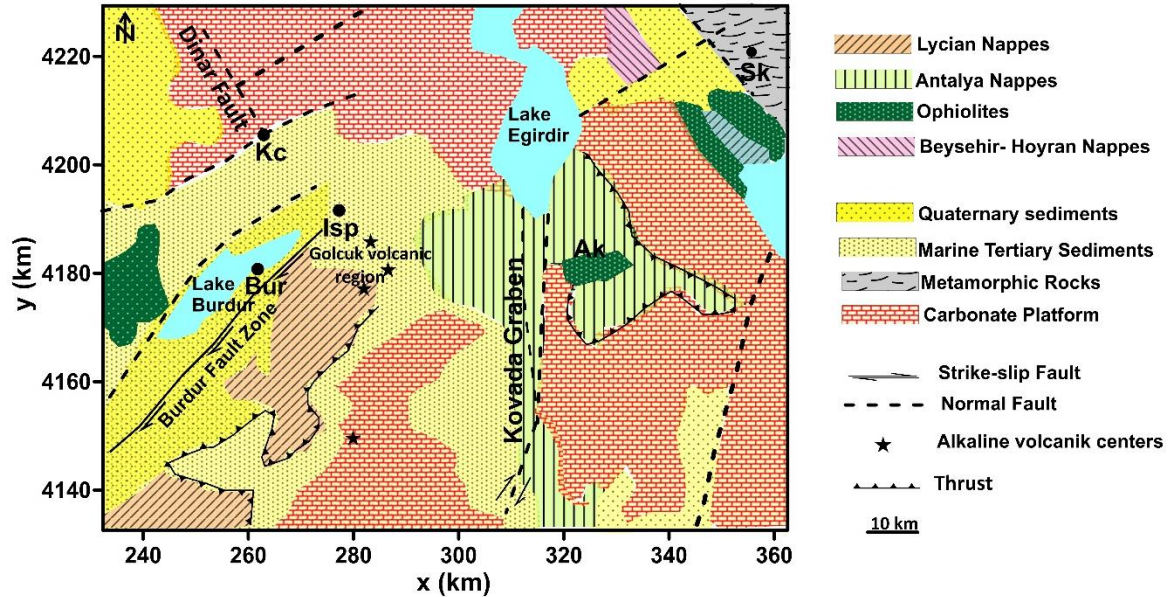


Figure 2. Simplified geological map of study area (modified from Yagmurlu et al., 1997; Dolmaz, 2007). Isp: Isparta, Ak: Aksu, Kc: Keciborlu, Sk: Sarkikaraagac

3. Material and Method

The aeromagnetic data used in this study were re-digitized from the study carried out by Ates et al. (1999). These data are recorded by the General Directorate of Mineral Research and Exploration of Turkey (MTA). The data including a period of 1979-1989 years were collected with 1-5 km profile interval and with an elevation of 600 m above ground level (Ates et al., 1999). As a first step, IGRF- 1982.5 (the International Geomagnetic Reference Field) was applied to them for reduction. To annihilate undesirable effects, as a second step, (such as earth's magnetic field and body magnetization) located on the anomaly, reduce to pole (RTP) technique (Baranov, 1957; Ansari and Alamdar, 2009) was employed. The RTP serves to be a filter allowing to eliminate the dipolar nature of magnetic anomalies. It also provides to transform magnetic anomalies from its asymmetric shape to symmetric shape.

The variance of aeromagnetic data in the study area is plotted as a map (see Fig. 3a) and it is observed that these values vary from -107 nT to 37 nT in the map. The map produced from the RTP operation is seen in Fig. 3b as well. During the application of the RTP operation, inclination and declination angles were taken as 54.6° and 3.7°, respectively. As can be seen from the map, RTP values range from -120 nT to 62 nT.

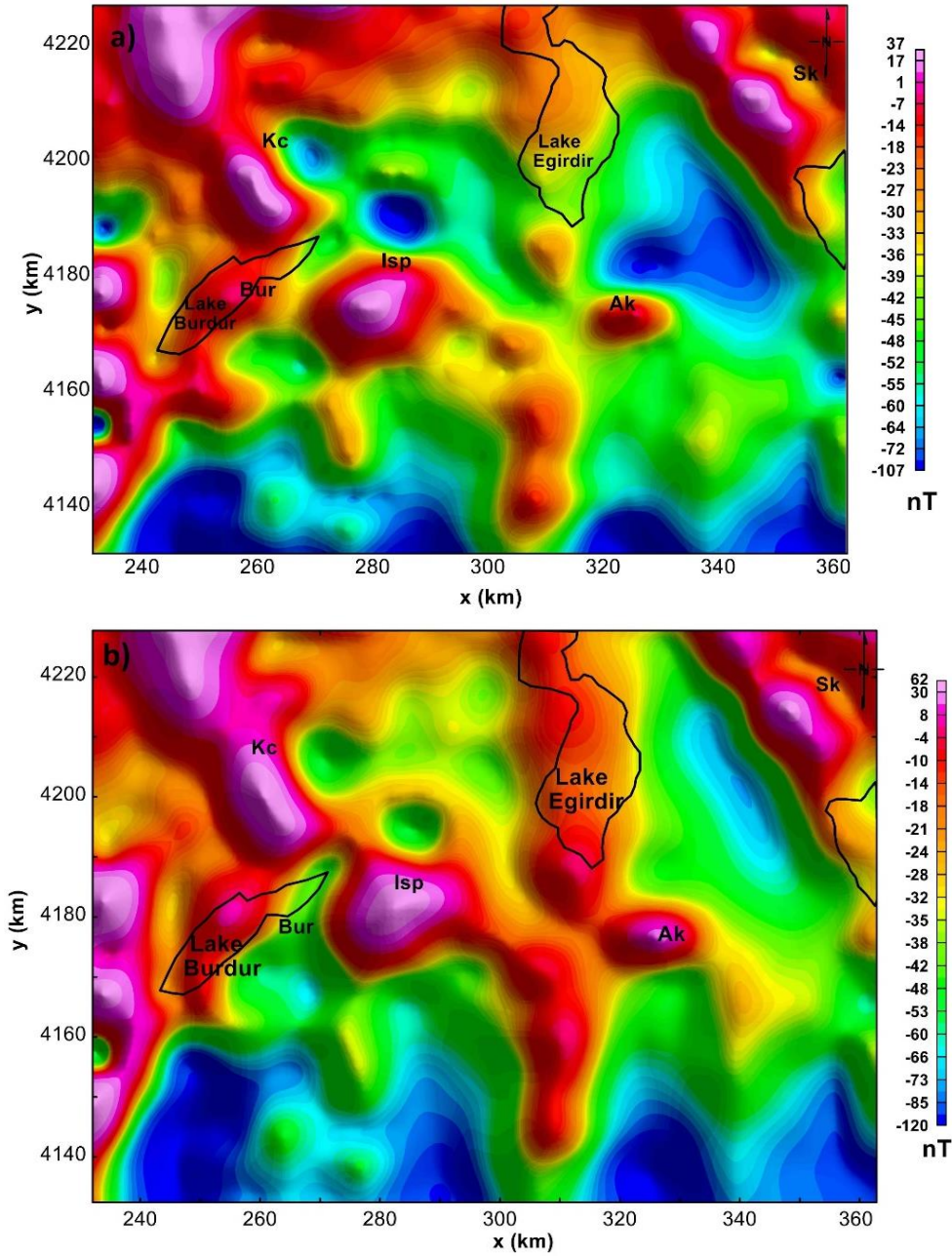


Figure 3. (a) Aeromagnetic map of Isparta Angle region in nT; (b) RTP anomaly map of Isparta Angle region in nT

In addition, spectral analysis developed by Spector and Grant (1970) has been applied to the RTP data in order to separate the regional and residual components of potential field data. By doing so, it is possible that the region can be divided into three segments with the averaged depths of causative sources ranged from 0.31 km to 6.72 km. The first segment represents the average depth of deeper magnetized sources and it has been calculated to be 6.72 km whereas the average depths of much shallower magnetized bodies have been calculated to be 1.60 km and 0.31 km, respectively for other segments (see Fig. 4).

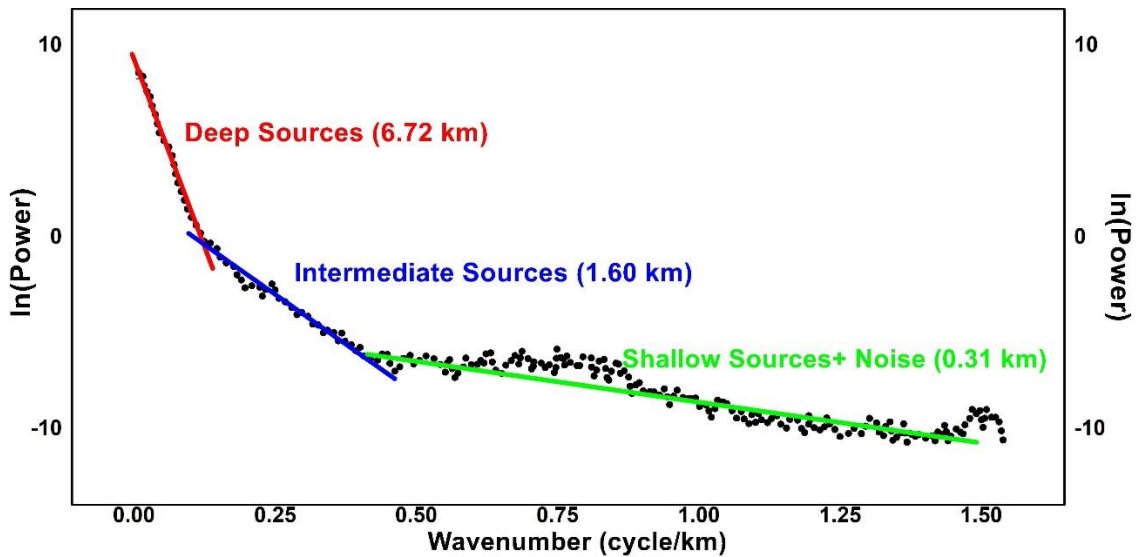


Figure 4. Radial average power spectrum and depth estimation for deep and shallow sources

3.1. Analytic Signal Transformation

Analytic Signal (AS), which is based on the vertical and horizontal derivatives of the potential field data, allows determining the location of the causative structure. The 2-D AS transformation was developed by Nabighian (1972) and it was later improved to the 3-D by Nabighian (1984). Roest et al. (1992) also defined as;

$$AS = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \quad (1)$$

where T is the total magnetic anomaly. $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$, and $\frac{\partial T}{\partial z}$ are the gradients of the magnetic field in the x, y and z-directions, respectively. The AS is widely used in the magnetic investigation because of the fact that it is independent of magnetization directions. The method has proved that the maximum amplitudes of the analytic signal are located over the edge of causative sources (Nabighian, 1972, 1984; Roest et al., 1992).

3.2. Tilt Angle Derivative Method

The tilt angle derivative (Tilt) method allows us to determine the trends/contacts region and boundaries of the magnetic bodies. The tilt angle is formulated by Miller and Singh (1994), as seen in Eq. 2

$$\text{Tilt} = \arctan \left[\frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}} \right] \quad (2)$$

The amplitudes of the Tilt method range from $-\pi/2$ to $+\pi/2$ due to the arctangent trigonometric function. The zero contours are located over the edges of the structures. The Tilt shows positive amplitudes over the magnetic sources whereas the negative amplitude values are also located outside of the magnetic bodies. In addition, Salem et al. (2007) improved the tilt-depth method to estimate the upper depth of the interpreted contact. According to this, $\pm\pi/2$ Radians ($\pm 45^\circ$) contours provide estimation of the upper depth for the sources. This method has an advantage in that it does not require any geological knowledge (Wang et al., 2016).

4. Results

The analysis procedure of aeromagnetic data via the abovementioned techniques are given step-by-step as follows: i) eliminate the effects stem from by the dipolar nature of the earth utilizing RTP operation, ii) separate the regional and residual anomalies at a different wavelength with spectral analysis of the data, iii) apply the AS and Tilt method to delineate the exact location of the structures.

By a closer look at Figs. 3a and 3b, the high magnetic anomalies are clearly observed around Isparta (Isp), Sarkikaraagac (Sk), Keciborlu (Kc), Aksu (Ak) and Kovada Graben area while the negative anomalies are located in the southern part of the region. Especially, strong anomalies around the Aksu correspond to ophiolite units while the other high magnetic intensity in Isparta could be associated with the existence of active volcanism

products (e.g., Golcuk volcanics).

Besides, the residual anomaly map shown in Fig. 5 was constructed by applying a high pass filter with the cut-off frequency of 0.40 cycle/km. The map shows that the Isparta basin, composed of having low-magnetic susceptibilities rocks, (alluvial units) is characterized by negative magnetic anomalies. However, Alkaline volcanic centers (see in Fig. 2) displayed high magnetic values.

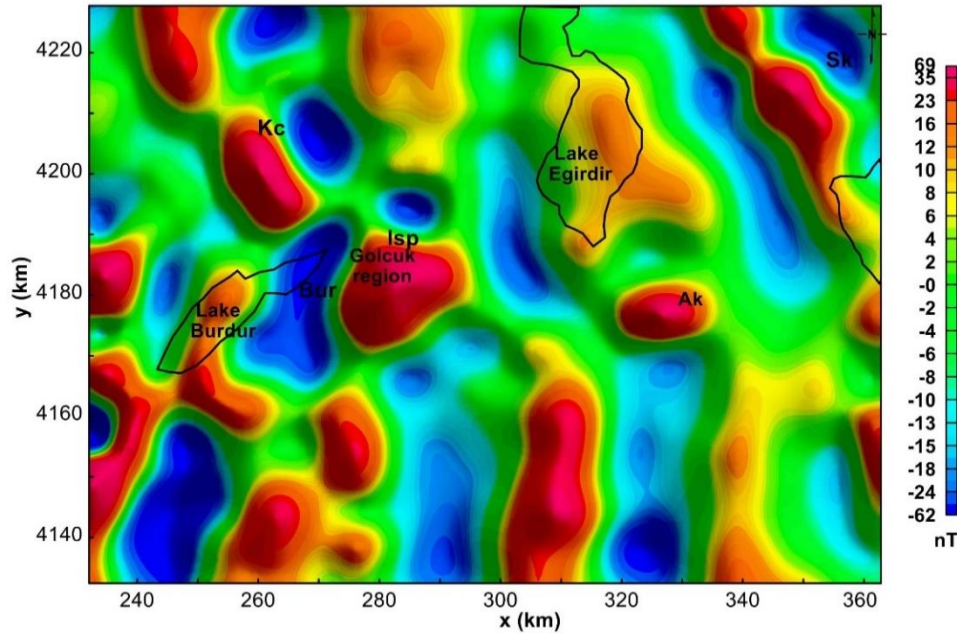


Figure 5. High-pass filtered magnetic anomaly map of the region

In this study, the AS transformation has been applied to the residual anomalies of the region. The map in Fig. 6 shows that four structures are located around Isparta City and these magnetic bodies (like volcanic cones, caldera) could be associated with the Golcuk volcanic region. The other maximum values are located around the Keciborlu and Aksu region, which may be related to the buried magnetized bodies and ophiolitic mass beneath the alluvial cover, respectively. In addition, the anomalies around Keciborlu may be caused by the Dinar fault system. The anomalies situated at the western part of Burdur Lake correspond to ophiolitic rocks (see Fig. 2). In addition, it is thought that the high magnetization in the NE of the map (around Sarkikaraagac) might be caused by Beysehir-Hoyran ophiolitic rocks deployed on metamorphic rocks and sedimentary units. All these outcomes are in good agreement with the previous study conducted by Dolmaz (2007).

In addition, the Tilt map has been produced from RTP data to determine the possible subsurface structure and their upper depths in the region (see Fig. 7). The map illustrates the zero contours corresponded to the edge of the structures and six important structures (labeled with A, B, C, D, E, F) were selected from the map to estimate the upper depths of bodies. The structure A might be associated with the Golcuk Crater lake area composed of the trachyandesite and andesitic rocks. The structures (volcanic cone, trachytic lava dome etc.) located in the Pliocene Golcuk volcanism region display high-amplitude anomalies on the map. By applying tilt-depth method, the calculated upper depths of these causative sources are listed in Table 1. As seen from this Table, the upper depths of the structure range between 3.6 and 4.3 km from the west edge to the east edge while the depths in north-south directions range from 2.8 km to 3.2 km, respectively. The Structure B located around Keciborlu region shows high-amplitude values and the region is represented by carbonate platform and marine tertiary sediments (see Fig. 2).

Table 1. The depths to top of the Golcuk region obtained from the tilt-depth method.

Structure A	Tilt-Depth (km)
West Edge	3.6 km
East Edge	4.3 km
North Edge	2.8 km
South Edge	3.2 km

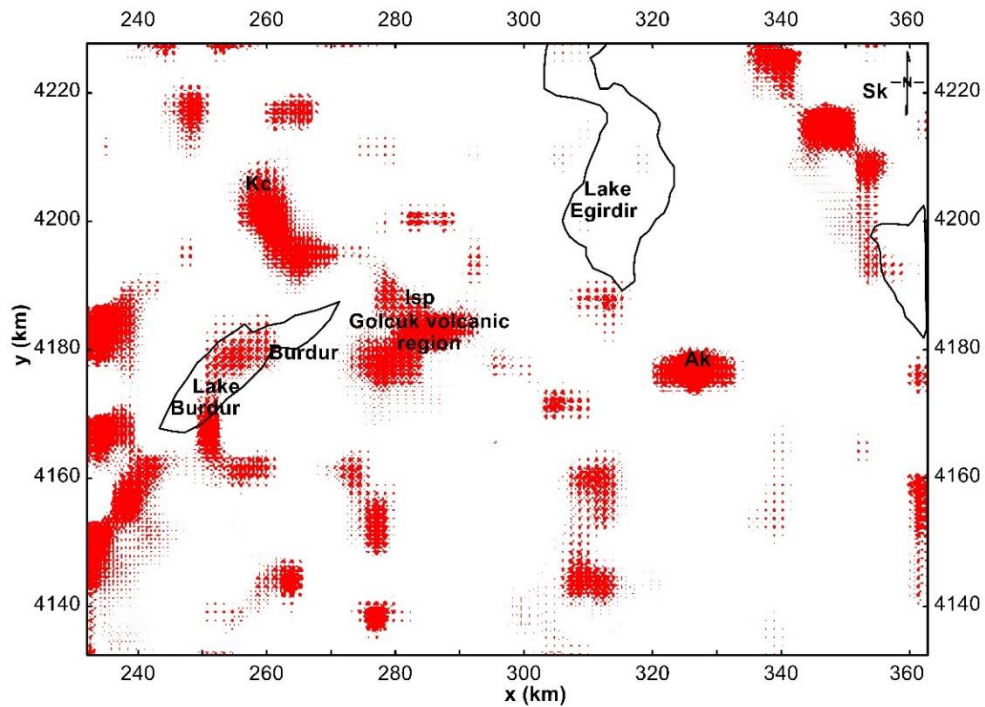


Figure 6. Analytic Signal transformation image map of Isparta Angle region

Considering surface geology, these high amplitudes could be caused by existence of a magnetized body under the surface and the upper depths of the bodies were computed around 3.1 km. It is considered that this anomaly may be signature of the Dinar fault. The structure C is situated at the southern part of the map and the map showed that high values in N-S direction can be correlated with the northern border of the Cyprus arc and Kovada Graben region (see Fig. 1b). However, the structure F located around Lake Egirdir displayed high values on the Tilt map whereas any high amplitudes were not observed at the AS map. Both Tilt of residual anomalies show N-S lineament trend from northern part to southern part of the study area. The structure D also represented by the ophiolite outcropped to surface around the Aksu region. The solutions of the Tilt map indicated that the ophiolite mass has a deeper root beneath the surface and the upper depths of the mass range from about 2.8 to 3.7 km, with an average of 3.25 km. The last remarkable structure labeled with E in the map is located around Sarkikaraagac. It is thought that the structure with the NW-SE trending line was caused by Beysehir-Hoyran ophiolite nappes described by Dolmaz (2007). However, this study shows that the mass outcropped to surface lied along approximately 20 km in the NW-SE direction underneath the metamorphic rocks.

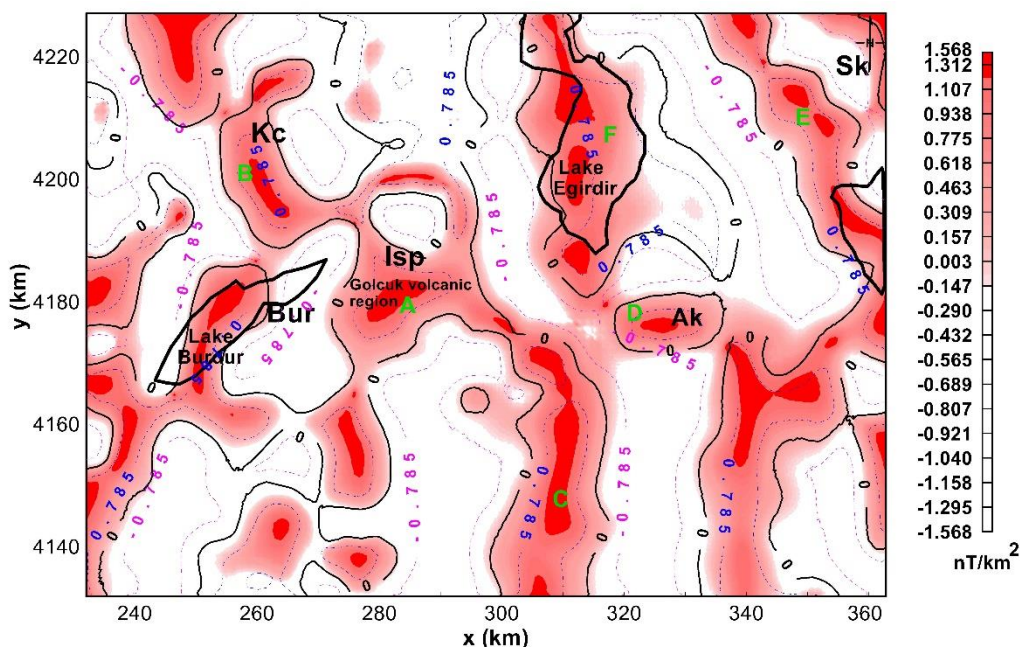


Figure 7. Tilt map of the RTP data. Black dash lines show zero contour of the tilt angle

5. Discussion and Conclusions

The main goal of this study is to analyze and interpret the aeromagnetic data for the Isparta Angle region. To delineate the boundaries of the structure located in the region, AS transformation has been utilized to the residual anomalies and the regions showing high amplitude have been detected. The radius of the structure around Keciborlu, which is thought to be a buried mass, covers an area of approximately 6.5 km while the ophiolitic mass located in Aksu shows a large and high value closure (approx. 8 km in radius). In addition to those, the maps produced by AS transformation and Tilt method show that Golcuk volcanic occurrences has a deeper and larger root (the average upper depth of the structure is around 3.47 km) underneath the surface. Furthermore, the causative source around Isparta can be defined as an ellipsoid shape with dimensions of approximately 23 km and 17 km at the E-W and N-S directions, respectively (Fig 7). Also, the strong anomalies around Sarkikaraagac are good accordance with the existence of ophiolitic mass. In addition to this observation, Fig 7 has shown that this mass may be continued under metamorphic rocks and sedimentary units in the NW- SE directions. However, this causative mass has not been observed on the surface geology map. Hence, this observation is defined for the first time in literature. Besides those, the strike-slip fault and normal fault zones with the N-S trending in Kovada graben have been clearly characterized by the zero contours. Similar observations have been detected for the Burdur fault zone. The zero contours elongate in the NE-SW direction and the result is in accordance with geological investigations. Consequently, the important structures of the Isparta Angle region and their edges have been revealed in detail by this study. Moreover, after calibration with known structures or other derived potential field products (AS and Tilt), the results have been interpreted geologically with better confidence.

Acknowledgement (Teşekkür)

The author would like to thank the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey for the use of magnetic data.

Conflict of Interest (Çıkar Çatışması)

No conflict of interest was declared by the author.

References (Kaynaklar)

- Ansari, A.H., Alamdar, K., 2009. Reduction to the pole of magnetic anomalies using analytic signal. *World Applied Sciences Journal*, 7, 405-409. <https://pdfs.semanticscholar.org/0c68/ba1ed775ac6c2007504e41f5db3e68f3b5ed.pdf>.
- Ates, A., Kearey, P., Tufan, S., 1999. New gravity and magnetic maps of Turkey (Research Note). *Geophysical Journal International*, 136, 499-502.
- Baranov, V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, 22, 359-383.
- Barka, A., Reilinger, R., Saroglu, F., Sengor, A.M.C., 1995. The Isparta angle: its importance in the neotectonics of the eastern Mediterranean region. Piskin, O., Ergun, M., Savascin, M.Y., Tarcan, G., (ed.). *IIESCA-1995 Proceedings* 3-17.
- Beyhan, G., Keskinsezer, A., 2016. Investigation of the gravity data from Fethiye-Burdur Fault Zone using the Euler deconvolution technique. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2, 195-201.
- Cengiz, O., Sener, E., Yagmurlu, F., 2006. A satellite image approach to the study of lineaments, circular structures and regional geology in the Golcuk Crater district and its environs (Isparta, SW Turkey). *Journal of Asian Earth Sciences*, 27, 155-163.
- Cordell, L. Grauch, V.J.S., 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. In: Hinze WJ (Ed.), *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps*. Society of Exploration Geophysicists, 181-197. <http://dx.doi.org/10.1190/1.0931830346.ch16>
- Dolmaz, M.N., Hisarlı, Z.M., Orbay, N., 2003. Interpretation of Bouguer gravity data of Burdur Basin. *Istanbul Journal of Earth Sciences Journal*, 16, 23-32.
- Dolmaz, M.N., 2007. An aspect of the subsurface structure of the Burdur-Isparta area, SW Anatolia, based on gravity and aeromagnetic data, and some tectonic implications. *Earth Planets Space*, 59, 5-12.
- Dolmaz, M.N., Oksum, E., Erbek, E., Tutunsatar, H.E., Elitok, O., 2018. The nature and origin of magnetic anomalies over the Gölçük caldera, Isparta, SW Turkey. *Geofizicheskiy Zhurnal-Geophysical Journal*, 40, 145-156.
- Elitok, O., Ozgur, N., Druppel, K., Dilek, Y., Platevoet, B., Guillou, H., Poisson, A., Scaillet, S., Satir, M., Siebel, W., Bardintzeff, J.M., Deniel, C., Yilmaz, K., 2010. Origin and geodynamic evolution of late Cenozoic potassium-rich volcanism in the Isparta area, southwestern Turkey. *International Geology Review*, 52, 454-504.
- Glover, C. and Robertson, A., 1998. Neotectonic intersection of the Aegean and Cyprus tectonic arcs: extensional and strike-slip faulting in the Isparta Angle, SW Turkey. *Tectonophysics*, 298, 103-132.
- Miller, H.G., Singh, V., 1994. Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32, 213-217.
- Monod, O., 1977. *Recherches Geologiques dans le Taurus Occidental au Sud de Beysehir (Turquie)*. Ph.D. thesis, Universite´de Paris-Sud, Orsay, France, 442, (unpublished).

Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and

- use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37, 507-517.
- Nabighian, M.N., 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations. *Geophysics*, 49, 780-786.
- Oksum, E., Dolmaz, M.N., Pham, L.T., 2019. Inverting gravity anomalies over the Burdur sedimentary basin, SW Turkey. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 54, 445-460. <https://doi.org/10.1007/s40328-019-00273-5>.
- Penck, W., 1918. Die tektonische Grundzüge Westkleinasiens. Eiszeitalter- Stuttgart.
- Poisson, A., Yagmurlu, F., Bozcu, M., Senturk, M., 2003. New insights on the tectonic setting and evolution around the apex of the Isparta Angle (SW Turkey). *Geological Journal*, 38, 257-282.
- Robertson, A.H.F., Dixon, J.E., Brown, S., Collins, A., Morris, A., Pickett, E., Sharp, I., Ustaomer, T. 1996. Alternative tectonic models for the Late Palaeozoic-Early Tertiary development of Tethys in the Eastern Mediterranean region, Palaeomagnetism and Tectonics of the Mediterranean Region, edited by Morris, A., Tarling D.H., Geological Society of London, Special Publication, 109, 239-263. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.105.01.22>.
- Roest, W.R., Verhoef, J., Pilkington, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 5, 116-125.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, J.D., Ravat, D., Smith, R., 2007. Tilt-depth method: A simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. *Leading Edge*, 26, 12.
- Spector, A., Grant, F.S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35, 293-302
- Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M., McKenzie, C., 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23, 116-119.
- Wang, Y.G., Zhang, J., Ge, K.P., Chen, X., Nie, F.J., 2016. Improved tilt-depth method for fast estimation of top and bottom depths of magnetic bodies. *Applied Geophysics*, 13, 249-256.
- Yagmurlu, F., Savascin, Y., Ergun, M. 1997. Relation of alkaline volcanism and active tectonism within the evolution of the Isparta Angle, SW Turkey. *Geological Journal*, 15, 717-728.



KÜTAHYA KENT MERKEZİNDE HAVA KALİTESİNİN ZAMANSAL VE MEKANSAL DEĞİŞİMİ

Kaan İŞINKARALAR*

Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kastamonu, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Hava Kirliliği,
Karbondiyoksit,
Kütahya,
Partikül Madde,
Hava Kalitesi.

Öz

Şehirlerdeki insan nüfusunda hızlı sanayileşme ile ciddi bir artış yaşanmaya başlamış ve bunun sonucunda kentlerdeki hava kalitesinin insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkisi görülmeye başlanmıştır. Hava kirliliği özellikle çarpık kentleşmenin ve plansız sanayileşmenin sonucu olarak birçok şehirde tehlike sınırlarını aşmaya başlamıştır. Kentsel alanlarda hava kirliliği, küresel ölçekte halk sağlığı üzerinde doğrudan etkisi olan temel çevre sorunları arasında yer almaktadır. Bu çalışmada Kütahya ilinde belirlenen 5 farklı dış ortam noktasında partikül madde (0,3, 0,5, 1, 2, 5 ve 10 µm boyutlarında) ve karbondiyoksit miktarları ölçülmüş, veriler SPSS 22.0 paket programı yardımıyla değerlendirilmiştir. Ölçüm Kütahya ilindeki farklı özelliklere sahip bu bölgelerin hava kalitesi açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Hava kirliliğinin ana kaynağı olarak sanayi faaliyetleri, trafik ve insan aktiviteleri gelmektedir. Kirlilik düzeyinin yüksek seviyede olması insan sağlığını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bundan dolayı kentsel planlamalarda bu durumun göz önüne alınarak gerekli tedbirlerin alınması gerekmektedir. Bu çalışmada Kütahya şehir merkezinin kış dönemine ait CO₂ kirliliği ve partikül madde yoğunluğunun zamansal ve mekansal değişiminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kütahya'daki hava kirliliğinin artışında ısınma başta olmak üzere kullanılan yakıtlar, endüstri faaliyetleri, enerji sağlama ve ulaşım araçlarından kaynaklı olarak yüksek düzeyde kirlilik tespit edilmiştir.

TEMPORAL AND SPATIAL VARIATION OF AIR QUALITY IN KÜTAHYA CITY CENTER

Keywords

Air Pollution,
Carbon Dioxide,
Kütahya,
Particulate Matter,
Air Quality.

Abstract

The human population and industrialization has increased that occur negative effect of the air quality on human health in the cities. Air pollution has started to exceed the limits of danger in many cities, especially due to unplanned urbanization and unplanned industrialization. The air pollution in urban areas is among the main environmental problems that show a adverse impact to public health in global sciae. In this study, the amounts of particulate matter (0.3, 0.5, 1, 2, 5 and 10 µm) and carbon dioxide were measured at 5 different outdoor locations determined in the province of Kütahya and the data were evaluated with the help of SPSS 22.0 package program. In terms of air quality measurement in regions where were evaluated and compared with different characteristics in Kütahya province. Industrial activities, traffic and human activities are the primary sources of air pollution. The high level of air pollution can significantly affect human health. For this reason, it is necessary to consider some precaution in urban planning. Thus, it is aimed to determine the temporal and spatial changes of CO₂ and particulate matter pollution in Kütahya city center during the winter. In the increase of air pollution originating, a high level of air pollution was detected due to the use of fuels used in other activities, industrial activities, energy supply and transportation, especially heating in Kütahya.

Alıntı / Cite

İşinkaralar, K., (2022). Kütahya Kent Merkezinde Hava Kalitesinin Zamansal ve Mekansal Değişimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 152-160.

* İlgili yazar / Corresponding author: kisinkaralar@kastamonu.edu.tr, +90-366-280-2930

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
K. Işınkaralar, 0000-0003-1850-7515	Başvuru Tarihi / Submission Date	23.09.2021
	Revizyon Tarihi / Revision Date	19.10.2021
	Kabul Tarihi / Accepted Date	19.10.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Hava kirliliği çeşitli kirleticilerden ve bunların birbirleriyle olan reaksiyonlarından oluşmaktadır. İnsana, hayvana, bitkiye ve cansız varlıklara tehdit oluşturan hatta ilerleyen süreçlerde zarar veren ciddi bir çevre sorunudur (Kinney, 2018). Artan nüfus, plansız kentleşme ve kontrolsüz sanayileşme gibi faaliyetler sonucu oluşan hava kirleticilerinin salınmasıyla birlikte hava kirliliği sorunu ortaya çıkmıştır (Brauer vd., 2012; Türkyılmaz vd., 2017; Öztürk vd., 2021a, b). Çeşitli gazlar, sıvılar veya küçük görünmez katılar, farklı doğa olayları, insan faaliyetleri ve yüksek düzeyde gazların reaksiyonu ile atmosfere farklı formlarda yerini almaktadır. Hava kirliliği özellikle yaşanan sanayi devriminden sonra günümüzde artan yaşam standartlarıyla birlikte dünyada popüler bir sorun olmuştur. Diğer çevre kirliliklerinden daha da ciddi olmasının sebebi ise hava olaylarının küresel çaplı olmasıdır (Zhu vd., 2011; Bayraktar, 2012; Lelieveld ve Pöschl, 2017; Türkyılmaz ve Işınkaralar, 2020). Hava kirliliği iklim değişikliğine, canlı yaşama ve cansızları da tehdit eden unsur olmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) göre, nüfusun % 90'ı kirli hava solumaktadır ve hava kirliliği her yıl yaklaşık 7 milyon insanın ölümüne sebep olmaktadır. Kirliliğin sağlık üzerindeki etkileri oldukça şiddetli olup felç, akciğer kanseri ve kalp hastalığına neden olmaktadır. Dahası, ozon tabakasının incilmesi ve sera gazı etkisi gibi birtakım hava olaylarını tetiklemektedir. Bu hava kirleticileri de insanlar ve dünyanın ekosistemi üzerinde dolaylı ve direk olarak olumsuz bir etkiye sahiptir (Jo vd., 2020; Varol vd., 2021). Bu kirleticilerin başında ağır metaller, uçucu organik bileşikler (UOB), poliklorlu bifeniller (PCB'ler), polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'ler), partikül maddeler (PM) ve karbondioksit (CO₂) gelmektedir (WHO, 2013).

Kirleticiler arasında en hızla artan CO₂ emisyonu olup her yıl bu değer ortalama 3 ppm olarak artış göstermiş ve 2021 yılının Ağustos ayı verilerine göre bu değer 414,47 ppm olduğu belirtilmiştir (www.co2.earth, 2021). Bu artış hızıyla ilerlerse CO₂ emisyonu 2050 yılında yaklaşık 500-700 ppm düzeyine çıkacaktır (Jacobson vd., 2019). Bunlar fosil yakıt kullanımına bağlı ev kaloriferleri ve sanayide kullanılan yanma ürünleri, araba, otobüs, kamyon, uçak, gemi, gibi mobil kirleticilerinde artması ayrıca azalan yeşil alanlar ve parklarla birlikte hızla artmaktadır (Öztürk ve Işınkaralar 2019a, b). Bunlara ek olarak ormanların yanması ve tahribatı, rüzgârların sahra bölgesinden taşıdığı tozlar, volkanik patlamalar, ithalat ve ihracatta önemli bir rol oynayan nükleer santraller ve diğer ağır makine sanayilerinden enerji elde etmek için CO₂ sorunu ortaya çıkmaktadır (Schweizer vd., 2007; Crump, 2011; Cetin vd., 2020). Ayrıca şehirlerin hakim rüzgârlarını kesecek şekilde yüksek katlı binalar yapılması hava kirleticilerin bu alanlarda birikmesine neden olmaktadır (Bergeron ve Strachan, 2011). Yoğun şehir merkezlerinde ise diğer şehirlere göre ortalama değerlerin 2-5 katı daha fazla miktarda CO₂ konsantrasyonu ölçülmektedir (Ward vd., 2015). Burada CO₂ konsantrasyonu şehirdeki yüksek bina sayısına, trafik yoğunluğuna, park ve bahçe alanlarına, rüzgâr hızlarına, topografik özelliklerine, iklimine ve inversiyon gibi birçok etkene bağlıdır (Briber vd., 2013; Işınkaralar vd., 2015).

PM'ler ise havada askıda kalan katı ve sıvı parçacıklardan oluşan, değişik boyutlara sahip kimyasal içerikleri olan parçacıklardır (Kim vd., 2015). Bunlar genelde inorganik iyonlardan (nitratlar, sülfatlar, amonyum, sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum vb.) elementel karbon, organik karbon, PAH'lar gibi organik karbonlar, endotoksin ve hücre parçaları gibi biyolojik bileşikler, demir, bakır, nikel, çinko gibi metallere oluşabilmektedir (Cheung vd., 2011; Işınkaralar, 2020; Savas vd., 2021). Ayrıca yeryüzü seviyesindeki ozondan (O₃) ve karbonmonoksit (CO) gibi diğer hava kirleticilerinden daha büyük bir tehdit oluşturmaktadır (Tomos vd., 2021). Her türlü yanma işlemleri, volkanik patlamalar, çöl tozlarının taşınımı, yol tozları, tarımsal aktivitelerden kaynaklı tozlar, nehir yatakları, inşaat faaliyetleri (kentsel dönüşüm), trafik ve madencilik başta olmak üzere hem antropojenik hem de doğal yollarla oluşabilmektedirler (Casati vd., 2007; Bayraktar vd., 2019a,b). Ayrıca PM'lerin şehirlerdeki emisyonlarının çoğunu trafik kaynaklı (aşınmış lastikler, aşınmış fren balatalarından kaynaklı tozlar ve süspansiyonların çalışmasından kaynaklı salınımlar vb.) oluşturmaktadır (De Kok vd., 2006). Partiküllerin sınıflandırması ise aerodinamik çapları ve atmosferdeki taşınmaları ile ilgilidir. Partikül maddelerin sınıflandırmasını akciğerlere penetrasyon yeteneğine göre; 10 µm'lik bir aerodinamik çapa sahip olanlar yani iri taneli (PM₁₀) ve 2,5 µm'lik bir aerodinamik çapa sahip ince partikül madde (PM_{2,5}) diye 2 sınıfa ayırmıştır (USEPA, 1996). Ancak 0.1 µm'den daha küçük bir çapa sahip olanlar ise ultra ince parçacık olarak tanımlanmaktadır. İnsan sağlığı açısından ise en tehlikeli olanlar en küçük parçacıklar olarak (<PM₁₀) tanımlanmaktadır. Bu küçük parçacıklar direk burun içerisinden alveollere geçmektedir (Londahl vd., 2007). Parçacık boyutları 5 ile 10 µm arasındakiler trakeobronşiyal yapıya, 1 and 5 µm arasındakiler solunum bronşiyollerinde ve alveollere, 1 µm ve altındakiler ise gaz molekülerine benzer bir yapıda difüzyon kuvvetiyle hareket ederek alveollere ardından da dokularla dolaşım sistemine nüfuz ederler ve buradan kalp ve akciğerin düzensiz çalışmasına, nefes almakta

zorluklara ve derin öksürüklere, hatta ölüme yol açabilmektedirler (Atkinson vd., 2010; Esworthy, 2013; Cadelis vd., 2014).

Bu çalışmanın amacı, Kütahya kent merkezinin farklı bölgelerindeki hava kalitesinin CO₂ ve farklı boyutlardaki PM'nin zamansal ve mekansal açıdan değişimini belirlemektir. Bu amaçla farklı zamanlarda ve farklı lokasyonlarda özellikle de sanayinin yoğun olduğu bölgelerde yapılan ölçümler ile kent merkezinin hava kalitesinin doğrudan ve dolaylı olarak nasıl etkilendiği tespit edilmeye çalışılmıştır. Daha sonra elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve yorumlarda bulunulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

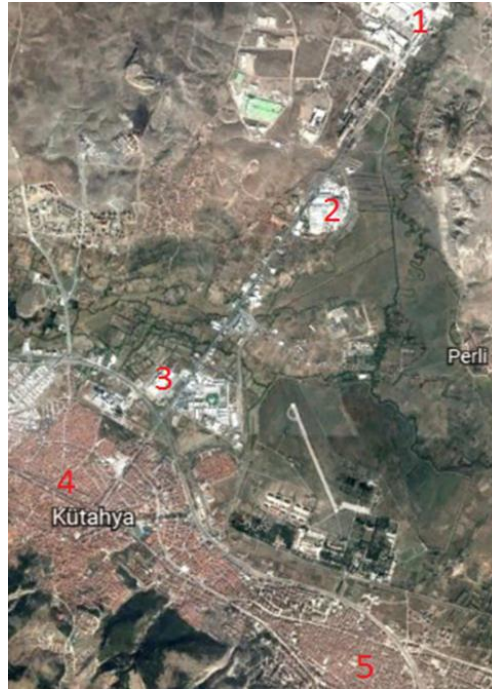
2.1. Çalışma Alanı (Study Area)

Çalışma kapsamında öncelikle Kütahya il merkezinin 2021 yılının Ocak ve Şubat aylarına ait, sanayi ağırlıklı olan bölgelerinde, hava kirliliğinin yoğun olabileceği yerler belirlenmiştir. Bu alanlar sanayi bölgelerinin hemen yanından (Kümaş AŞ., Şeker Fabrikası, Güral Porselen) ve yerleşim alanlarından (Spor kent mahallesi, Merkez vazo bölgesi) seçilmiştir. Çalışma kapsamında 5 farklı lokasyonda ölçüm noktaları belirlenmiştir. Bu noktalarda ölçüm saatlerindeki insan sayıları 50 kişinin altında ise insan yoğunluğu yok, 50 kişinin üzerinde ise insan yoğunluğu var olarak belirtilmiştir. Örneklem yerleri Kümaş AŞ. "K", Güral porselen "G", Şeker fabrikası "Ş", Vazo mevki "V" ve Sporkent mevki "S" harfleri ile kodlanmış ve Tablo 1'de özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Ölçüm yapılan alanlar ve özellikleri (Characteristics of the measured areas)

No	Yer	Özelliği	Yakıt türü	İnsan yoğunluğu
1	K	sinter manyezit ve bazik-asidik refrakter üretimi	doğalgaz	Yok
2	G	seramik bazlı ürünlerin üretimi	doğalgaz	Yok
3	Ş	şeker üretimi	doğalgaz	Yok
4	V	açık alan	-	Var
5	S	açık alan	-	Var

Çalışma için ölçümlerin yapıldığı Ocak ve Şubat ayları Kütahya il merkezinin hava kalitesinin en düşük olduğu dönemlerdir. Ölçüm yapılan alanların konumları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Örneklerin alındığı alanların haritadaki konumları (Samples locations of the areas on the map)

2.2. Örnekleme Yöntemi (Sampling Method)

Çalışma kapsamında belirlenen noktalarda gün içerisinde iki saatte bir (08:00-22:00 arasında) ve 1 Ocak 2021 tarihinde başlayarak 28 Şubat 2021 tarihinde sona erecek şekilde ölçümler yapılmış ve 6 farklı boyutta partikül madde ile CO₂ ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen değerlere SPSS 22.0 paket programı

yardımıyla Varyans analizi ve Duncan testi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar tablolaştırılarak yorumlanmıştır. Çalışma boyunca CO₂ ölçümleri 'Extech EA80 marka portatif Hava Kalitesi Ölçer' hava kalitesi ölçüm cihazı ile partikül madde ölçümleri ise üç kanallı 'Lighthouse 3013' partikül sayma cihazı ile yerden ortalama 1,5 m yükseklikten 10'ar tekrarlı olacak şekilde yapılmıştır. Partikül madde ölçümleri 0,3 µm (PM_{0,3}), 0,5 µm (PM_{0,5}) 1 µm (PM₁), 5 µm (PM₅) ve 10 µm (PM₁₀) olarak yapılmıştır.

3. Bulgular (Findings)

Değişik boyutlardaki partikül madde ve CO₂ konsantrasyonunun gün bazında değişimi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. PM (adet/L) ve CO₂ konsantrasyonunun (ppm) gün bazında değişimi
(Variation of PM (piece/L) and CO₂ concentration (ppm) on a daily)

Gün	PM _{0,3}	PM _{0,5}	PM ₁	PM _{2,5}	PM ₅	PM ₁₀	CO ₂
Pazartesi	164728	47102	13391,9	1045,7	430,2	136,4	1210,5 bc
Salı	137536	44287,9	5601,3	952	334,9	103,8	1105,2 a
Çarşamba	150379	48339,2	6064	1032,1	357,3	105,9	1098,6 a
Perşembe	156387	47733,8	4388	1016,8	394,5	118,3	1151,2 ab
Cuma	166686	43608,9	19734,4	1070,8	406,8	121,8	1235,2 cd
Cumartesi	168817	56765,1	20729,3	1112,3	418,4	123,3	1296,8 d
Pazar	169113	53403	19319,6	1010,1	417,3	124,5	1299,1 d
F değeri	1,01ns	0,78ns	1,86ns	0,21ns	0,69ns	0,51ns	14,61***

***:p<0,001, ns: p>0,05, Harfler ise Duncan testi sonucunda yer aldığı grupları göstermektedir.

Varyans analizi sonucunda çalışmaya konu karakterlerden sadece CO₂ konsantrasyonunun gün bazında değişiminin istatistiki olarak anlamlı düzeyde (p<0,001) olduğu belirlenmiştir. Duncan testi sonuçlarına göre CO₂ konsantrasyonunun en düşük ortalama değerlerinin hafta içi günlerde (Salı, Çarşamba ve Perşembe), en yüksek konsantrasyonların ise hafta sonu (Cumartesi ve Pazar) günleri elde edildiği görülmektedir. Çalışmaya konu parametrelerin lokasyon bazında değişimi Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. PM ve CO₂ konsantrasyonunun (ppm) lokasyon bazında değişimi
(Variation of PM and CO₂ concentration (ppm) at a location)

No	Yer	PM _{0,3}	PM _{0,5}	PM ₁	PM _{2,5}	PM ₅	PM ₁₀	CO ₂
1	K	143088 a	54135,5 c	46158,5 b	1546,79 e	662,36 d	203,5 d	1225,64
2	G	143511 a	41602,93 b	5533,93 a	786,43 b	290,14 b	87,64 ab	1208,07
3	Ş	137771 a	44199 b	6142,43 a	1097 c	391 c	134,21 c	1184,36
4	V	223102 b	80271,36 d	3992,14 a	1295,93 d	413,21 c	109,36 bc	1242,36
5	S	147989 a	23534 a	1907,64 a	445,14 a	214,29 a	61 a	1137,14
F değeri		20,61***	51,58***	30,38***	59,89***	64,44***	32,30***	3,28ns

***:p<0,001, ns: p>0,05, Harfler ise Duncan testi sonucunda yer aldığı grupları göstermektedir.

Partikül madde ve CO₂ konsantrasyonunun lokasyon bazında değişimini gösterir tablo incelendiğinde CO₂ konsantrasyonunun lokasyon bazında değişiminin istatistiki olarak anlamlı düzeyde olmadığı (p>0,05), partikül madde değerlerinin tamamının ise lokasyon bazında değişiminin istatistiki olarak anlamlı düzeyde (P<0,001) olduğu görülmektedir. Duncan testi sonuçlarına göre PM_{0,3} ve PM_{0,5}'de en yüksek ortalama değerler V'de elde edilmiştir. Büyük boyutlu partikül madde bakımından ise en yüksek değerler K'da elde edilmiştir. S'de elde edilen değerlerin tamamının Duncan testi sonucunda ilk grupta olması dikkat çekmektedir. Çalışmaya konu parametrelerin K'da gün bazında değişimi Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. PM ve CO₂ konsantrasyonunun (ppm) K'daki gün bazında değişimi
(Variation of PM and CO₂ concentration (ppm) on a Daily at K)

Gün	PM _{0,3}	PM _{0,5}	PM ₁	PM _{2,5}	PM ₅	PM ₁₀	CO ₂
Pazartesi	144812	54486,5 a	50006,5 b	1594,5 ab	702,5 b	212 b	1221 bc
Salı	129532	44258,5 a	6511 a	1269,5 a	529,5 a	171,5 a	1071,5 a
Çarşamba	140281,5	49555,5 a	7649 a	1524,5 ab	644,5 ab	195,5 ab	1035,5 a
Perşembe	146627,5	53111,5 a	8409,5 a	1566 ab	663 b	206,5 ab	1158 ab
Cuma	147389	54862 a	84663 c	1647,5 ab	706,5 b	211,5 b	1345,5 cd
Cumartesi	146207	55367 a	83521,5 c	1702 b	705 b	220 b	1376,5 d
Pazar	146772	67307,5 b	82349 c	1523,5 ab	685,5 b	207,5 ab	1371,5 d
F değeri	0,38 ns	4,21**	14,37***	1,28 ns	2,58*	1,96 ns	8,87***

*:p<0,05, **:p<0,01, ***:p<0,001, ns: p>0,05, Harfler ise Duncan testi sonucunda yer aldığı grupları göstermektedir.

K'da 0,3 μ , 2,5 μ ve 10,0 μ boyutlu partikül maddelerin gün bazında değişiminin istatistiki olarak anlamlı düzeyde olmadığı ($p>0,05$) belirlenmiştir. Duncan testi sonucunda Pazar günü elde edilen bütün değerler son homojen grupta yer almıştır. Bütün parametreler bakımından en yüksek değerlerin Cuma, Cumartesi ve Pazar günleri elde edilmiş olması dikkat çekmektedir. Genel olarak en düşük değerler ise Salı ve Çarşamba günlerinde elde edilmiştir. Çalışmaya konu parametrelerin G için gün bazında değişimi Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. PM ve CO₂ konsantrasyonunun (ppm) G'deki gün bazında değişimi
(Variation of PM and CO₂ concentration (ppm) on a Daily at G)

Gün	PM _{0,3}	PM _{0,5}	PM ₁	PM _{2,5}	PM ₅	PM ₁₀	CO ₂
Pazartesi	154926 b	48347	5825,5	849,5	289,5 abc	96 cd	1197,5 ab
Salı	125387,5 ab	38363	4827	670,5	245,5 a	73 ab	1106 a
Çarşamba	121133,5 a	36842	4756	766	256 a	66 a	1127 a
Perşembe	126784 ab	37871,5	5081	786	281 ab	82 bc	1167 a
Cuma	157685,5 b	27828,5	5672	894,5	283 ab	91,5 cd	1213 abc
Cumartesi	159434,5 b	49594	6303	959,5	349,5 c	100,5 d	1333 c
Pazar	159232,5 b	52374,5	6273	579	326,5 bc	104,5 d	1313 bc
F değeri	3,01*	2,15 ns	2,52 ns	1,89 ns	3,24*	9,85***	4,69**

*:p<0,05, **:p<0,01, ***:p<0,001, ns: p>0,05, Harfler ise Duncan testi sonucunda yer aldığı grupları göstermektedir.

G'deki en küçük (0,3 μ) ve en büyük (5 μ ve 10 μ) boyutlu partikül maddeler ile CO₂ konsantrasyonunun gün bazında değişiminin istatistiki olarak anlamlı düzeyde olduğu ($p<0,05$) belirlenmiştir. Duncan testi sonucunda Cumartesi ve Pazar günleri elde edilen bütün değerlerin son homojen grupta yer aldığı görülmektedir. Genel olarak ise en düşük değerler Salı Çarşamba ve Perşembe günlerinde elde edilmiştir. Çalışmaya konu parametrelerin Ş'nin gün bazında değişimi Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. PM ve CO₂ konsantrasyonunun (ppm) Ş'deki gün bazında değişimi
(Variation of PM and CO₂ concentration (ppm) on a Daily at Ş)

Gün	PM _{0,3}	PM _{0,5}	PM ₁	PM _{2,5}	PM ₅	PM ₁₀	CO ₂
Pazartesi	137039,5	43745,5	6846	1117,5	398,5	138,5	1221
Salı	135706	44277,5	5580	1085,5	421,5	129	1161,5
Çarşamba	139155,5	47591	5898	1090	397,5	138,5	1075,5
Perşembe	137567,5	43125	5630	1023	388	136	1090
Cuma	136539	42571,5	6490	1027	386,5	137	1207
Cumartesi	138869	44161	6395	1162,5	359	129	1295
Pazar	139522	43921,5	6158	1173,5	386	131,5	1240,5
F değeri	0,01 ns	0,20 ns	0,56 ns	0,09 ns	0,04 ns	0,01 ns	1,80 ns

ns: p>0,05, Harfler ise Duncan testi sonucunda yer aldığı grupları göstermektedir.

Ş'de çalışmaya konu parametrelerin tamamının gün bazında değişiminin istatistiki olarak anlamlı düzeyde olmadığı ($p<0,05$) belirlenmiştir. Bundan dolayı verilere Duncan testi uygulanmamıştır. Çalışmaya konu parametrelerin V'nin gün bazında değişimi Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. PM ve CO₂ konsantrasyonunun (ppm) V'deki gün bazında değişimi
(Variation of PM and CO₂ concentration (ppm) on a Daily at V)

Gün	PM _{0,3}	PM _{0,5}	PM ₁	PM _{2,5}	PM ₅	PM ₁₀	CO ₂
Pazartesi	228335	84854b	3595,5 abc	1286	516,5 b	163,5 b	1288,5 bc
Salı	159938	53396,5 a	6551 c	1020	289,5 a	84 a	1103 a
Çarşamba	215343,5	68375 ab	7937,5 c	1119,5	308 a	74,5 a	1159 ab
Perşembe	230464	89629,5 b	1138,5 a	1396,5	449,5 ab	109 ab	1217,5 ab
Cuma	237788,5	88205 b	1183 a	1436	441 ab	109,5 ab	1292 bc
Cumartesi	243824,5	88181 b	6021 bc	1396	445 ab	111 ab	1270,5 bc
Pazar	246025	89258,5 b	1518,5 ab	1417,5	443 ab	114 ab	1366 c
F değeri	1,01 ns	2,71*	3,58*	0,66 ns	2,64*	2,24 ns	4,31**

*:p<0,05, **:p<0,01, ns: p>0,05, Harfler ise Duncan testi sonucunda yer aldığı grupları göstermektedir.

V'deki 0,5 μ , 1 μ ve 5 μ boyutlu partikül maddeler ile CO₂ konsantrasyonunun gün bazında değişiminin istatistiki olarak anlamlı düzeyde olduğu ($p<0,05$) belirlenmiştir. Duncan testi sonucunda 0,5 μ boyutlu partikül madde miktarı bakımından en düşük değerlerin Salı ve Çarşamba günü elde edildiği, 1 μ boyutlu partikül madde miktarı bakımından en düşük değerlerin Perşembe ve Cuma, en yüksek değerlerin Salı ve Çarşamba günleri elde edildiği, 5 μ boyutlu partikül madde miktarı bakımından ise en düşük değerlerin Salı ve Çarşamba, en yüksek değerlerin ise pazartesi elde edildiği görülmektedir. CO₂ konsantrasyonu bakımından ise en düşük değerler Salı, Çarşamba ve

Perşembe günü, en yüksek değer ise Pazar günü elde edilmiştir. Çalışmaya konu parametrelerin S'deki gün bazında değişimi Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. PM ve CO₂ konsantrasyonunun (ppm) S'deki gün bazında değişimi
(Variation of PM and CO₂ concentration (ppm) on a daily at S)

Gün	PM _{0,3}	PM _{0,5}	PM ₁	PM _{2,5}	PM ₅	PM ₁₀	CO ₂
Pazartesi	158527,5	4077 a	686 a	381 a	244	72	1124,5 ab
Salı	137121	41144 b	4537,5 b	714,5 b	188,5	61,5	1084 a
Çarşamba	135985,5	39332,5 b	4079,5 b	660,5 b	180,5	55	1096 a
Perşembe	140492,5	14931,5 a	1681 a	312,5 a	191	58	1123,5 ab
Cuma	154031	4577,5 a	664 a	349 a	217	59,5	1118,5 ab
Cumartesi	155750,5	46522,5 b	1406 a	341,5 a	233,5	56	1209 b
Pazar	154018	14153 a	299,5 a	357 a	245,5	65	1204,5 b
F değeri	0,09 ns	5,85**	9,20***	4,40**	0,31 ns	0,08 ns	2,87*

*:p<0,05, **:p<0,01, ***:p<0,001, ns: p>0,05, Harfler ise Duncan testi sonucunda yer aldığı grupları göstermektedir.

G'deki en küçük (0,3 µ) ve en büyük (5 µ ve 10 µ) boyutlu partikül maddelerin gün bazında değişiminin istatistiki olarak anlamlı düzeyde olmadığı (p>0,05) belirlenmiştir. Duncan testi sonucunda Salı ve çarşamba günleri elde edilen bütün değerlerin son homojen grupta yer aldığı görülmektedir. Partikül madde miktarı bakımından genel olarak en düşük değerler pazartesi, perşembe, cuma ve pazar günlerinde elde edilmiştir. CO₂ miktarı bakımından ise en düşük değerler salı ve çarşamba, en yüksek değerler ise cumartesi ve pazar günlerinde elde edilmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç (Discussion and Conclusion)

Bu çalışmada Ocak-Şubat 2021 dönemine ait 2 ay boyunca Kütahya kent merkezinde bulunan 5 farklı konuma ait dış ortam PM ve CO₂ parametreleri ölçümleri yapılmıştır. PM₁₀ konsantrasyonunun gün bazında değişimi en yüksek değeri pazartesi günü elde edilirken CO₂ için bu değer 1299,1 ppm ile Pazar günü elde edilmiştir. K'daki PM₁₀ ve CO₂ değerine baktığımız zaman cumartesi gününe zirve yaparak diğer günlerden daha yüksek çıktığı görülmüştür. K ile kodlanmış olan bu yerde Manyezit üretimi yapılmakta ve bu günlerde emisyonlarda artış görülmüştür. Bir diğer yüksek emisyon değerine sahip olan V ile kodlanmamış olan sanayi bölgesi olmamasına rağmen, halka açık ve trafik yoğunluğunun çok olduğu ancak ağaçlandırma ve peyzaj bitkilendirmesinin yok denecek kadar az olduğu bir alan olup burada PM₁₀ gün içerisinde en çok pazartesi günleri, CO₂ emisyonunda ise 1288,5 ppm ile en yüksek değeri ölçülmüştür. Kentsel hava kirliliğinin kaynakları yapılan diğer çalışmalarda görüldüğü gibi bu çalışmada da konutlarda kullanılan fosil yakıt kalitesi ve miktarı, trafik kaynaklı emisyon salınımları bu çalışmada da etkisini V ve S alanlarında göstermiştir. Bu nedenle kullanılan yakıt türlerinin kalitesinin artırılması gerekmektedir. Kullanılan araçlarda ise emisyon salınımlarının düzenli bir şekilde kontrol edilmesi ayrıca sanayide kullanılan ağır vasıta araçlarının yakıtındaki kalitenin artırılması ve araç bakımlarının düzenli yapılması gerekmektedir. Bunlara ek olarak trafik yoğunluğu yaşanan bu alanlarda trafiğin rahatlaması adına planlamalar yapılmalıdır. Araç sayısının bu bölgelerde azaltılması yada araç trafiğine kapalı alanların oluşturulması gerekmektedir. Mentese ve Çotuker, (2021)'de yapmış oldukları çalışmada Çanakkale iline ait Çan ilçesinde ısınma amaçlı faaliyetlerden kaynaklanan ve yaz döneminde artan seyahat yoğunluğu nedeniyle trafik kaynaklı PM₁₀ konsantrasyonlarında artış eğilimi gözlenmiştir. Tepe ve Doğan, (2019)'da Türkiye'nin güney sahilinde yer alan Adana, Antalya, Hatay ve Mersin illerinde bulunan hava kalitesi izleme istasyonlarından alınan PM₁₀ verileri karşılaştırılmış ve konsantrasyonlarının AB direktiflerinde verilen sınır değerlerden yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Özellikle de cumartesi ve pazar günleri insanların daha çok evlerde vakit geçirmesinden dolayı artan evsel ısınma faaliyetlerinden kaynaklanan PM ve CO₂ değerleri yükselmiştir. Haftanın günlerine bakıldığında sabah iş ve okul başlangıç saatlerinde bu değerlerde ciddi bir artış olmuştur. Isinkaralar vd. (2017)'de Kastamonu Üniversitesi kampüs içerisindeki yaptıkları çalışmada en yüksek PM₁₀ değerini yaz ayında, CO₂'i ise 746 ppm ile kış aylarında ölçmüşlerdir. Çetin ve Şevik, (2017)'de Kastamonu kent merkezinde bulunan Kışla parkında yapılan ölçümde en yüksek CO₂ değer ortalaması 705 ppm olarak bulmuşlardır. CO₂ konsantrasyonunun kentsel ölçekteki yapılan çalışmalarda, Chicago'da 384 ppm (Grimmond vd., 2002), Kore'de 478 ppm (Yoon vd., 2011), Şangay'da 435-550 ppm (Kim ve Choi, 2019), Polonya Krakov'da 411 ppm (Chmura vd., 2008), Irak Erbil'de 418 ppm (Abbas vd., 2019), İspanya Platosu'nda 384 ppm (Garcia vd., 2008), Roma'da 477 ppm (Gratani ve Varona, 2005), Dallas'ta 475 ppm (Clark-Thorne ve Yapp 2003), Hawaii'de 373 ppm (Keeling ve Whorf, 2005), California'da 397 ppm (Newman vd., 2008) Hindistan'ın Vilathur şehrinde 425 ppm (Palanivelraja ve Manirathinem, 2009) ve Brezilya'da 384 ppm (Sikar ve Scala, 2004) olarak ölçülmüştür.

Partikül madde kirliliğinin pek çok kaynağı bulunmakla birlikte enerji santralleri, araç egzozu, fabrikalar ve endüstriyel faaliyetler en önemli PM kaynaklarıdır (Bell vd, 2011; Shahid vd., 2017; Grzędzicka, 2019). Trafik emisyonları, şehirlerde hava ve toprak kirliliğinin ana küresel kaynağıdır (Kimbrough vd., 2013; Adelasoye ve Alamu, 2016; Kumar vd., 2016; Türkyılmaz vd., 2018). Yollardan kaynaklanan emisyonlar PM_{2.5}'in yaklaşık% 66'sına katkıda bulunur (Grzędzicka, 2019). Yapılan diğer çalışmalarda da yapılan ölçümlerde kış aylarında PM ve

CO₂ seviyelerinin diğer aylara göre daha yüksek olduğu görülmüştür (Isinkaralar and Gullu 2018). PM değerlerinin artışı insan aktiviteleriyle paralel olarak arttığı ve hakim rüzgarların bunların taşınmasında önemli olduğu görülmüştür (Tong vd., 2015; Isinkaralar and Gullu 2017). CO₂ değerlerinde ise vejetasyon mevsimi dışında gerçekleştirilen çalışmada mevsimsel koşullarının hava kalitesi üzerinde önemli bir etkisi olduğu ortaya konmuştur. Şehrin yerleştiği alan dağlar arasında kaldığı zaman, vadi yüzünden hakim rüzgar yönü olan kuzey cephenin kapanmaması şehri havalandırılması açısından oldukça önemlidir. Çalışma sonuçlarına göre genel olarak partikül madde kirliliğinin en yüksek aralık, sonra şubat, sonra kasım ve en düşük ocak ayında olduğu belirlenmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar alınmıştır. Adin vd., (2017) Batman'da 2006-2011 yılları arasında kış döneminde (Kasım-Mart ayları arasında) PM miktarının değişimini değerlendirdikleri çalışmada en yüksek değerlere 2010 yılında, 2010 yılındaki en yüksek değerlere ise Kasım ve Aralık aylarında ulaşıldığı belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre hafta içi elde edilen PM değerleri hafta sonu elde edilen değerlerden daha yüksek düzeydedir. Büyük boyutlu partikül madde sayıları bakımından ise gece yarısı (01:00-03:00 saatlerinde) PM değerlerinin daha düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Abbas, K. A., Suliman, A. K., Hamad, A. T., & Saleh, K. N. (2019). Assessment of CO₂ with Weather Factors and its Percentage for Indoor and Outdoor. *Journal of university of Anbar for Pure science*, 13(2), 23-31.
- Adelasoye, K.A., Alamu, L.O., (2016). Accumulation of heavy metal pollutants in soil and vegetation and their effects on soil microbial population on roadsides in Ogbomosho, Nigeria. *J. Environ. Sci. Water Res.* 5 (1), 001–007.
- Adin, H., Yaşar, F., Altun, Ş., & İşcan, B. (2017). Batman Şehir Merkezinde Hava Kirliliği ve Kontrolü. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(1/2), 48-55.
- Atkinson, R. W., Fuller, G. W., Anderson, H. R., Harrison, R. M., & Armstrong, B. (2010). Urban ambient particle metrics and health: a time-series analysis. *Epidemiology*, 501-511.
- Bayraktar OY (2012) The resistance of the alternative plaster mortars to the high temperature effect. Gazi University, Institute of Science and Technology, Master's thesis, Ankara.
- Bayraktar, O. Y., Sağlam-Citoglu, G., & Abo Aisha, A. E. S. (2019a). The use of scrap tires in the construction sector. *International Journal of Trend in Research and Development*, 6(1), 253–256.
- Bayraktar, O. Y., Sağlam-Citoglu, G., & Abo Aisha, A. E. S. (2019b). Performance research of lime based mortars. *International Journal of Trend in Research and Development*, 6(1), 257–259.
- Bell, M.L., Morgenstern, R.D., Harrington, W., (2011). Quantifying the human health benefits of air pollution policies: review of recent studies and new directions in accountability research. *Environ. Sci. Pol.* 14, 357–368.
- Bergeron, O., & Strachan, I. B. (2011). CO₂ sources and sinks in urban and suburban areas of a northern mid-latitude city. *Atmospheric Environment*, 45(8), 1564-1573.
- Brauer, M., Amann, M., Burnett, R. T., Cohen, A., Dentener, F., Ezzati, M., ... & Thurston, G. D. (2012). Exposure assessment for estimation of the global burden of disease attributable to outdoor air pollution. *Environmental science & technology*, 46(2), 652-660.
- Briber, B. M., Hutyrta, L. R., Dunn, A. L., Raciti, S. M., & Munger, J. W. (2013). Variations in atmospheric CO₂ mixing ratios across a Boston, MA urban to rural gradient. *Land*, 2(3), 304-327.
- Cadelis, G., Tourres, R., & Molinie, J. (2014). Short-term effects of the particulate pollutants contained in Saharan dust on the visits of children to the emergency department due to asthmatic conditions in Guadeloupe (French Archipelago of the Caribbean). *PloS one*, 9(3), e91136.
- Casati, R., Scheer, V., Vogt, R., & Benter, T. (2007). Measurement of nucleation and soot mode particle emission from a diesel passenger car in real world and laboratory in situ dilution. *Atmospheric Environment*, 41(10), 2125-2135.
- Cetin, M., Şevik, H., Türkyilmaz, A., & Işinkaralar, K. Using Abies's Needles as Biomonitors of Recent Heavy Metal Accumulation. *Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences*, 7(1), 1-6.
- Cheung, K., Daher, N., Kam, W., Shafer, M. M., Ning, Z., Schauer, J. J., & Sioutas, C. (2011). Spatial and temporal variation of chemical composition and mass closure of ambient coarse particulate matter (PM_{10-2.5}) in the Los Angeles area. *Atmospheric environment*, 45(16), 2651-2662.
- Chmura, L., Rozanski, K., Necki, J. M., Zimnoch, M., Korus, A., & Pycia, M. (2008). Atmospheric concentrations of carbon dioxide in southern Poland: Comparison of mountain and urban environments. *Polish Journal of Environmental Studies*, 17(6), 859.
- Clark-Thorne, S. T., & Yapp, C. J. (2003). Stable carbon isotope constraints on mixing and mass balance of CO₂ in an urban atmosphere: Dallas metropolitan area, Texas, USA. *Applied Geochemistry*, 18(1), 75-95.
- Crump, D. (2011). Climate change–health impacts due to changes in the indoor environment; research need.
- De Kok, T. M., Driece, H. A., Hogervorst, J. G., & Briedé, J. J. (2006). Toxicological assessment of ambient and traffic-related particulate matter: a review of recent studies. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 613(2-3), 103-122.
- Esworthy, R. (2013, January). Air quality: EPA's 2013 changes to the particulate matter (PM) standard. Library of Congress, Congressional Research Service.
- Fisk, W. J. (2017). The ventilation problem in schools: literature review. *Indoor Air*, 27(6), 1039-1051.
- Garcia, M. O., Ovasapyan, T., Greas, M., & Treseder, K. K. (2008). Mycorrhizal dynamics under elevated CO₂ and nitrogen

- fertilization in a warm temperate forest. *Plant and Soil*, 303(1), 301-310.
- Gratani, L., Varone, L., (2006). Carbon sequestration by *Quercus ilex* L. and *Quercus pubescens* Willd. and their contribution to decreasing air temperature in Rome. *Urban Ecosyst.* 9, 27-37.
- Grimmond, C. S. B., King, T. S., Cropley, F. D., Nowak, D. J., & Souch, C. (2002). Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago. *Environmental Pollution*, 116, S243-S254.
- Grzędzicka, E. (2019). Is the existing urban greenery enough to cope with current concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀ and CO₂. *Atmospheric Pollution Research*, 10(1), 219-233.
<https://www.co2.earth> (erişim tarihi: Ağustos 2021).
- Isinkaralar K., Cetin M., İçen H.B., Sevik H. 2015. Indoor quality analysis of CO₂ for student living areas. The international conference on science, Ecology and technology I (Iconsete'2015 - Vienna) Abstract Book pp:123, August 25-28, 2015, Vienna, Austria
- Isinkaralar, K, Gullu, G. 2017. Investigation of Particulate Matter (Pm₁₀) Concentration Depend on Time in Kastamonu Atmosphere. *Ecology Symposium 2017*. p.199. 11-13 May, Kayseri Turkey
- Isinkaralar, K, Gullu, G. 2018. The Impact of Meteorological Parameters on Urban Air Quality (PM₁₀ and SO₂) in Kastamonu Province. *Ecology Symposium 2018*. p.371. 19-23 June, Kastamonu Turkey
- Isinkaralar, K. (2020). Removal of Formaldehyde and BTEX in Indoor Air Using Activated Carbon Produced from Horse Chestnut (*Aesculus Hippocastanum* L.) Shell. Ph.D. Thesis Hacettepe University Institute of Science Department of Environmental Engineering. Ankara, Turkey.
- Jacobson, M. Z. (2010). Enhancement of local air pollution by urban CO₂ domes. *Environmental science & technology*, 44(7), 2497-2502.
- Jacobson, T. A., Kler, J. S., Hernke, M. T., Braun, R. K., Meyer, K. C., & Funk, W. E. (2019). Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nature Sustainability*, 2(8), 691-701.
- Jo, J., Jo, B., Kim, J., Kim, S., & Han, W. (2020). Development of an iot-based indoor air quality monitoring platform. *Journal of Sensors*, 2020.
- Kabir, E., Kim, K. H., Sohn, J. R., Kweon, B. Y., & Shin, J. H. (2012). Indoor air quality assessment in child care and medical facilities in Korea. *Environmental monitoring and assessment*, 184(10), 6395-6409.
- Keeling, C. D., & Whorf, T. P. (2005). Atmospheric carbon dioxide record from Mauna Loa. Carbon Dioxide Research Group, Scripps Institution of Oceanography, University of California La Jolla, California, 92093-0444.
- Kim, K. H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment international*, 74, 136-143.
- Kim, M. K., & Choi, J. H. (2019). Can increased outdoor CO₂ concentrations impact on the ventilation and energy in buildings? A case study in Shanghai, China. *Atmospheric environment*, 210, 220-230.
- Kimbrough, S., Baldauf, R.W., Hagler, G.S.W., Shores, R.C., Mitchell, W., Whitaker, D.A., Croghan, C.W., Vallero, D.A. (2013). Long-term continuous measurement of near-road air pollution in Las Vegas: seasonal variability in traffic emissions impact on local air quality. *Air Qual. Atmos. Health* 6, 295-305.
- Kinney, P. L. (2018). Interactions of climate change, air pollution, and human health. *Current environmental health reports*, 5(1), 179-186.
- Kumar, P., de Fatima Andrade, M., Ynoue, R.Y., Fornaro, A., de Freitas, E.D., Martins, J., Martins, L.D., Albuquerque, T., Zhang, Y., & Morawska, L. (2016). New directions: from biofuels to wood stoves: the modern and ancient air quality challenges in the megacity of Sao Paulo. *Atmos. Environ.* 140, 364-369.
- Lelieveld, J., & Pöschl, U. (2017). Chemists can help to solve the air-pollution health crisis.
- Newman, S., Xu, X., Affek, H. P., Stolper, E., & Epstein, S. (2008). Changes in mixing ratio and isotopic composition of CO₂ in urban air from the Los Angeles basin, California, between 1972 and 2003. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D23).
- Menteşe, S. & Çotuker, O. (2021). Partikül madde, karbon monoksit ve karbondioksit seviyelerinin iç ve dış ortamlarda değişimi . *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* , 9 (3) , 723-734 . DOI: 10.21923/jesd.811053
- Öztürk, S., & İşinkaralar, Ö. (2019a). Kastamonu kent merkezinde otopark sorunsali: eleştirel bir değerlendirme parking problematique in kastamonu city center: a critical evaluation. *The Journal*, 12(67).
<http://dx.doi.org/10.17719/jisr.2019.3738>
- Öztürk, S. & İşinkaralar, Ö. (2019b). Eğlence parklarında ziyaretçi memnuniyet düzeyinin belirlenmesi: wonderland eurasia tema parki örneği. *Yüzcüncü Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi* , 3. Uluslararası batı asya turizm araştırmaları kongresi özel sayısı , 31-52 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/yyusbed/issue/51801/673519>
- Öztürk, S., İşinkaralar, Ö., Yılmaz, D. & Çılgınoğlu, H. (2021a). Bir kültür turizmi destinasyonu olarak hasankeyf örneğinde ziyaretçi memnuniyeti . *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 23 (2) , 359-369 . DOI: 10.24011/barofd.901027
- Öztürk, S. , İşinkaralar, Ö. & Yılmaz, D. (2021b). Restorasyon çalışmaları sonrası yerel halkın algı ve tutumları (Kayseri Kalesi Örneği) . *Doğu Coğrafya Dergisi* , 26 (45) , 183-194 . DOI: 10.17295/ataunidcd.933070
- Palanivelraja, S., & Manirathinam, K. I. (2009). A comparative study on indoor air quality in a low cost and a green design house. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 3(5), 120-130.
- Savas, D. S., Sevik, H., Isinkaralar, K., Turkeyilmaz, A., & Cetin, M. (2021). The potential of using *Cedrus atlantica* as a biomonitor in the concentrations of Cr and Mn. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-8.
- Schweizer, C., Edwards, R. D., Bayer-Oglesby, L., Gauderman, W. J., Ilacqua, V., Jantunen, M. J., ... & Künzli, N. (2007). Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 17(2), 170-181.
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., & Niazi, N. K. (2017). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of hazardous materials*, 325, 36-58.
- Sikar, E., & La Scala, N. (2004). Methane and carbon dioxide seasonal cycles at urban Brazilian inland sites. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 47(2), 101-106.
- Tepe, A. M. & Doğan, G. (2019). Türkiye'nin güney sahilinde yer alan dört şehrin hava kalitelerinin incelenmesi . *Mühendislik*

- Bilimleri ve Tasarım Dergisi , 7 (3) , 585-595 . DOI: 10.21923/jesd.535124
- Tomos, I., Dimakopoulou, K., Manali, E. D., Papiris, S. A., & Karakatsani, A. (2021). Long-term personal air pollution exposure and risk for acute exacerbation of idiopathic pulmonary fibrosis. *Environmental Health*, 20(1), 1-13.
- Tong, Z., Whitlow, T.H., MacRae, P.F., Landers, A.J., & Harada, Y. (2015). Quantifying the effect of vegetation on near-road air quality using brief campaigns. *Environ. Pollut.* 201, 141–149.
- Türkyılmaz A, Şevik H, Işınkaralar K, 2018. Investigation of Heavy Metal Accumulation in the Black Pine Needles. *Ecology Symposium* 2017. p.196. 11-13 May, Kayseri Turkey
- Türkyılmaz, A. & Işınkaralar, K. (2020). Sulu çözeltilerden aktif karbon üzerine adsorpsiyon ile antibiyotiklerin (tetrasiklin ve penisilin g) giderimi . *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* , 8 (3) , 943-951 . DOI: 10.21923/jesd.762953
- Turkyılmaz, A., Sevik, H., & Işınkaralar, K. (2017). Investigation of heavy metal accumulation in the black pine needles. In *Ecology Symposium 2017* (p. 196) 11–13 May, Kayseri, Turkey
- U.S. Environmental Protection Agency (1996) Review of National Ambient Air Quality Standards for Ozone: Assessment of Scientific and Technical Information (Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC), EPAy452y5-96-007, pp. 34–37
- Varol T, Canturk U, Cetin M, Ozel HB, Sevik H (2021) Impacts of climate change scenarios on European ash tree (*Fraxinus excelsior* L.) in Turkey. *Forest Ecology and Management*. *Forest Ecology and Management* 491 (2021) 119199. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119199.
- Ward, H. C., Kotthaus, S., Grimmond, C. S. B., Björkegren, A., Wilkinson, M., Morrison, W. T. J., ... & Iamarino, M. (2015). Effects of urban density on carbon dioxide exchanges: Observations of dense urban, suburban and woodland areas of southern England. *Environmental Pollution*, 198, 186-200.
- World Health Organization. (2013). Health Effects of Particulate Matter: Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia.
- Yoon, C., Lee, K., & Park, D. (2011). Indoor air quality differences between urban and rural preschools in Korea. *Environmental Science and Pollution Research*, 18(3), 333-345.
- Zhu, T., Shang, J., & Zhao, D. (2011). The roles of heterogeneous chemical processes in the formation of an air pollution complex and gray haze. *Science China Chemistry*, 54(1), 145-153.



DEPREM ETKİLERİNİN BETONARME ÇERÇEVELER İLE BAĞ KİRİŞLİ BETONARME PERDELER TARAFINDAN BİRLİKTE KARŞILANDIĞI BİNALARDA BAĞ KİRİŞİ MODELLERİNİN YAPI PERFORMANSINA ETKİSİ

Ömer ÖZER^{1*}, S. Bahadır YÜKSEL²

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

²Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Betonarme Bağ Kirişi, Doğrusal Olmayan Analiz, TB DY (2018), Performans Hedefleri, Kesit Hasar Sınırları.</i>	Betonarme yapıların birçoğunda deprem etkileri, kolon ve kirişlerin oluşturduğu çerçeveler ile bağ kirişli perdeler tarafından birlikte karşılanmaktadır. Betonarme perdeleri birbirine bağlayan bağ kirişleri ise kullanılan malzeme ve donatı düzeniyle farklılık göstermektedir. Bu çalışmanın amacı, farklı betonarme bağ kirişli modellerinin, yapı performansına olan etkilerinin incelenmesidir. Çalışmada 14 katlı, düşey taşıyıcı olarak kolon ve bağ kirişli perdelerin beraber kullanıldığı yapı modelinin, İstanbul Atatürk Havaalanı bölgesinin yer ivmesine göre doğrusal olmayan itme analizleri yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçları incelendiğinde kompozit ve diyagonal bağ kirişli modelinin yüksek yatay yük dayanımı sağladığı, ancak çift bağ kirişli modeline göre deplasman yapabilme kapasitesinin daha düşük olduğu görülmüştür.

THE EFFECT OF COUPLING BEAM MODELS IN BUILDINGS WHERE EARTHQUAKE LOADS ARE JOINTLY RESISTED BY R/C FRAMES AND R/C COUPLED SHEAR WALLS ON STRUCTURAL PERFORMANCE

Keywords	Abstract
<i>R/C Coupled Beam, Nonlinear Analysis, TBEC (2018), Targeted Performance Levels, Limits of Damage in Construction Elements.</i>	In many reinforced concrete structures, the effects of earthquakes are jointly resisted by reinforced concrete (R/C) frames and reinforced concrete (R/C) coupled shear walls. The coupling beams connecting the R/C shear walls differ in used material and reinforcement steel bar layout. The aim of this study is to examine the effects of different R/C coupling beam models on structural performance. In this study, nonlinear pushover analyses were performed on 14-storey structure model in which columns and coupled shear walls are used together as vertical carriers according to the ground acceleration of the İstanbul Atatürk Airport region. When the results of the analyses were examined, it was observed that the composite and diagonally reinforced coupling beam models provided high horizontal load resistance but had a lower displacement capacity than the double beam – coupling beam model.

Alıntı / Cite

Özer, Ö., Yüksel, S. B., (2022). Deprem Etkilerinin Betonarme Çerçevesel ile Bağ Kirişli Betonarme Perdeler Tarafından Birlikte Karşılandığı Binalarda Bağ Kirişli Modellerinin Yapı Performansına Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 161-179.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ö. Özer, 0000-0002-5126-6832
S. B. Yüksel, 0000-0002-4175-1156

Makale Süreci / Article Process

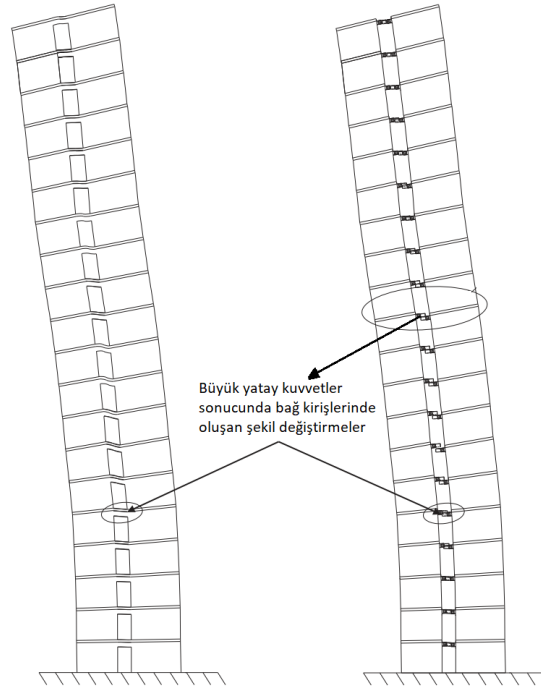
Başvuru Tarihi / Submission Date	16.02.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	10.09.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	30.09.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

* İlgili yazar / Corresponding author: omer@anahtarmuhendislik.com, +90-332-238-2727

1. Giriş (Introduction)

Yapıların tasarlanmasında, taşıyıcı sistem seçimi depreme dayanıklı yapı tasarımında büyük önem taşımaktadır. Bağ kirişli betonarme perdeler ile kolon ve kirişlerin kullanıldığı çerçeveler statik projelendirmelerde sıklıkla beraber kullanılmaktadır.

Betonarme perde duvarlar, yapıların yatay yük dayanımını önemli ölçüde arttırmaktadır (Özsoy Özbay ve Kaya, 2019). Özellikle deprem yükleri altında perdelerde büyük kesit zorlanmaları ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple betonarme perdeler birbirine bağlanırken özel tasarlanmış bağ kirişlerinin kullanılması gerekmektedir. Şekil 1'de bu tip bağ kirişli-boşluklu betonarme perde uygulaması ve büyük yatay yüklemeler sonucu oluşabilecek şekil değiştirmeler gösterilmiştir (Montgomery, 2013).



Şekil 1. Betonarme Bağ Kirişli Perdelerde Yük Deformasyon Etkisi (Montgomery, 2013) (Load Deformation Effect on R/C Coupled Shear Walls)

Bağ kirişli perdeli sistemlerde en sık görülen hasar durumları, rijit bodrum katlardan sonra gelen katlardaki perde tabanlarında ve bağ kirişlerinde görülmektedir. Kapı ve pencere boşlukları üzerindeki bağ kirişlerinde hasar şekilleri ve perdelerde meydana gelen yatay yük kaynaklı hasarlar durumları ise bağ kirişlerinde kullanılacak malzeme ve donatılara yön vermektedir.

Bu çalışmanın amacı, deprem etkilerinin kolon ve kirişlerin oluşturduğu çerçeveler ile bağ kirişli perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalarda, bağ kirişlerinin yapı performansına olan etkilerini araştırmaktır. Çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'in önerdiği bağ kirişi modellerinin yanında literatürde yer edinmiş bağ kirişi modellerine de yer verilmiştir (TBDY, 2018).

Bu çalışmada daha önceki çalışmalardan farklı olarak, birçok uygulama projesinde tercih edilen, bağ kirişli perdelerin ve çerçeve elemanlarının kat içinde homojen dağıldığı bir analiz modelinde bağ kirişi modelinin yapı performansına olan etkileri incelenmiştir. Çalışmada kullanılacak 4 farklı bağ kirişi modellerinin, çerçeveler ve bağ kirişli perdelerin beraber bulunduğu analiz modellerinde, literatürde daha önce tercih edilmemiş çok çeşitli ve detaylı değerlendirme başlıkları altında yapı performansına sağladıkları avantaj ve dezavantajlar belirlenecektir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Literatürde betonarme bağ kirişi modellerinin yapı performansına olan etkilerinin incelendiği birçok araştırma yapılmıştır. 2014 yılında yapılan bir çalışmada, bağ kirişli perdeli yapıların, sadece binadaki deformasyon taleplerini azaltmakla kalmayıp aynı zamanda elastik olmayan deformasyonu sınırlandıran yatay yüke dayanıklı sistemler olduğunun üzerinde durmuştur (Eljadei ve Harries, 2014). Bir diğer çalışmada çapraz donatılı bağ kirişlerinin hesaplama formüllerine eleştiri getirilmiş ve beton katkısının da dikkate alındığı farklı formüller

önerilmiştir (Budiono vd., 2019). Gong ve Shahrooz'un 2001 yılında yayınlanan makalelerinde, çelik ve çelik – beton malzemelerin beraber kullanıldığı bağ kirişlerinin, yapıların deprem performansına olan etkilerini incelemişlerdir (Gong ve Shahrooz, 2001). 2017 yılında yapılan bir diğer çalışmada, diyagonal donatılar yerine sadece düz donatıların kullanıldığı dört tam ölçekli bağ kirişinin deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır (Seo vd., 2017). Kompozit bağ kirişlerinin incelendiği bir diğer çalışmada, çelik levha ile güçlendirilmiş kompozit bağ kirişlerinde yüksek dayanımlı betonların kullanıldığı bağ kirişleri önerilmiştir (Hou vd. 2019). Çelik profillerle güçlendirilmiş betonarme bağ kirişlerinin kullanıldığı 7 yarı ölçekli modelin kullanıldığı bir çalışmada, bu tip bağ kirişleri ile toplam bağ kirişi yüksekliğinin azaltılabileceği ve bu tip bağ kirişlerinin yüksek mukavemet ve yatay yük dayanımı gösterdiğinin üzerinde durmuşlardır (Li vd., 2019). Bir başka çalışmada, çapraz donatılı bağ kirişleri için diyagonal donatı takviyesinin miktarının belirlenmesinde farklı öneriler sunmuştur. Ayrıca, yapılan çalışmada, ortaya çıkan kesme kuvvetinin karşılanmasında diyagonal çubuklara ek olarak betonun da katkıda bulunduğunu göstermişlerdir (Lim vd., 2016). 2020 yılında yapılan bir çalışmada, doğrusal olmayan analizlerde çubuk elemanların modellenmesinde dikkat edilmesi gereken hususlar üzerinde durulmuştur (Foroughi vd., 2020). 2020 ve 2021'de yapılan 2 farklı çalışmada, tünel kalıp formundaki yapılarda ve bağ kirişli perdelerin çekirdekte yoğunlaştığı yapılarda, bağ kirişi modellerinin yapı performansına olan etkileri araştırılmıştır (Özer ve Yüksel, 2020a; 2020b; 2021).

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

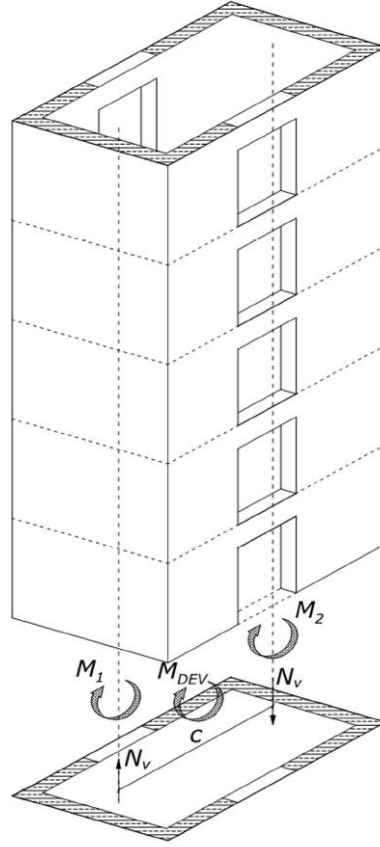
3.1. Bağ Kirişi Modelleri (Coupled Beam Models)

TBDY (2018) 4.5.4'te ise bağ kirişli (boşluklu) perdelerin tanımlanmasında esas alınan bağ derecesi katsayısı olan Ω 'nın, Eşitlik (1)'e göre elde edilmesi önerilmiştir (TBDY, 2018). Burada M_{DEV} perdenin tabanındaki toplam devrilme momentini, M_1 ve M_2 birbirine bağlanan perdelerin tabanında oluşan eğilme momentini, N_v deprem etkisinde bağ kirişlerindeki çekme ve basınç eksenel kuvvetlerini, c ise her bir perdenin ağırlık merkezleri arasındaki uzaklığı belirtir (Şekil 2). TBDY (2018) 7.4.1.1'de kiriş enkesit koşullarında uyulması gereken sınırlar belirtilmiştir. Ancak aynı maddenin son kısmında ise bağ kirişlerinin bu sınırlamalara tabi olmadığından bahsedilmiştir. Dolayısıyla Eşitlik (2)'nin sağlandığı durumlarda, perdeleri birbirine bağlayan kiriş elemanı bağ kirişi olarak kabul edilecek ve TBDY (2018) 7.4.1.1'de belirlenen kiriş enkesit koşullarına uyma zorunluluğu bulunmayacaktır. Modellemede kullanılan X ve Y Yönündeki bağ kirişlerinin Ω değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

$$\Omega = \frac{cN_v}{M_{DEV}} = \frac{cN_v}{M_1 + M_2 + cN_v} \quad (1)$$

Bulunan Ω değerinin Eşitlik (2)'yi sağlaması durumunda ise birbirine bağ kirişleriyle bağlanan perdelerin bağ kirişli (boşluklu) perde olarak kabul edilmesi öngörülmüştür (TBDY, 2018).

$$\Omega \geq 1/3 \quad (2)$$



Şekil 2. Bağ Derecesi Katsayısının Saptanmasında Kullanılan Parametrelerin Şematik Gösterimi (ideYAPI, 2020) (Schematic Representation of the Parameters Used to Determine the Coupling Degree Coefficient)

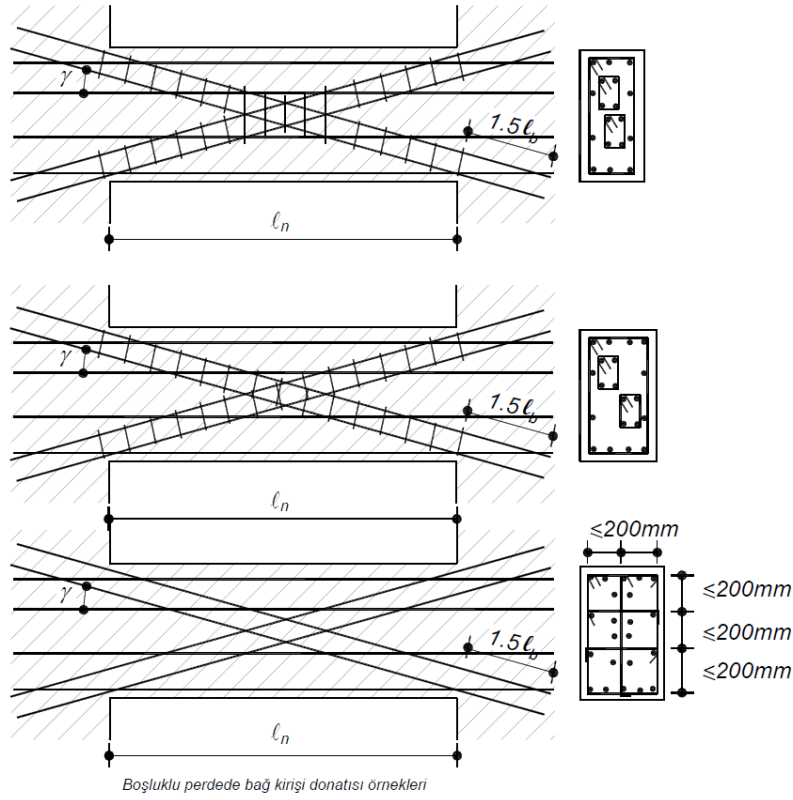
Tablo 1. Analiz Modelinin Lokasyon ve Deprem Parametreleri (Location and Earthquake Parameters of the Analysis Model)

Yön	c	N _v (kN)	M ₁ (kNm)	M ₂ (kNm)	Ω
Y	4	13658	7910	7912	0.775 > 1/3
X	4,65	11214	5084	13209	0.74 > 1/3

Bağ kirişlerinde çapraz donatı kullanılması, birçok yönetmelikte belli şartlar oluştuğunda zorunlu tutulmuştur. ACI-318 (2019) bölüm 18.10.7'de de Eşitlik (3)'ün sağlandığı durumlarda çapraz donatıların kullanılması gerekmektedir (ACI, 2019). Benzer şekilde TBDY (2018)'de ise Eşitlik (3) ve Eşitlik (4)'ün aynı anda sağlandığı durumlarda, düz donatıların yanında çapraz donatıların Şekil 3'teki gibi kullanılması zorunlu tutulmuştur (TBDY, 2018).

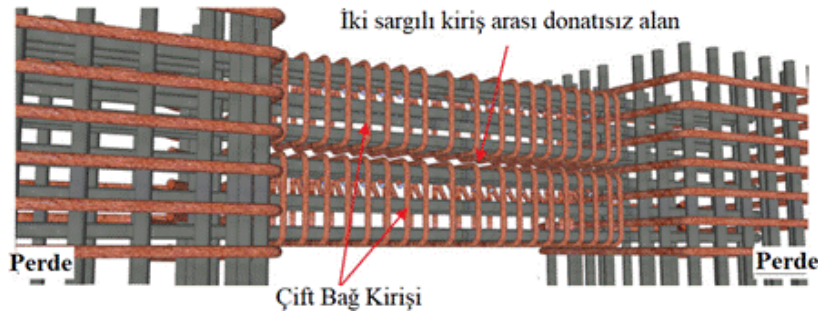
$$l_n \leq 2 h_k \quad (3)$$

$$V_d > 1.5 b_w d f_{ctd} \quad (4)$$



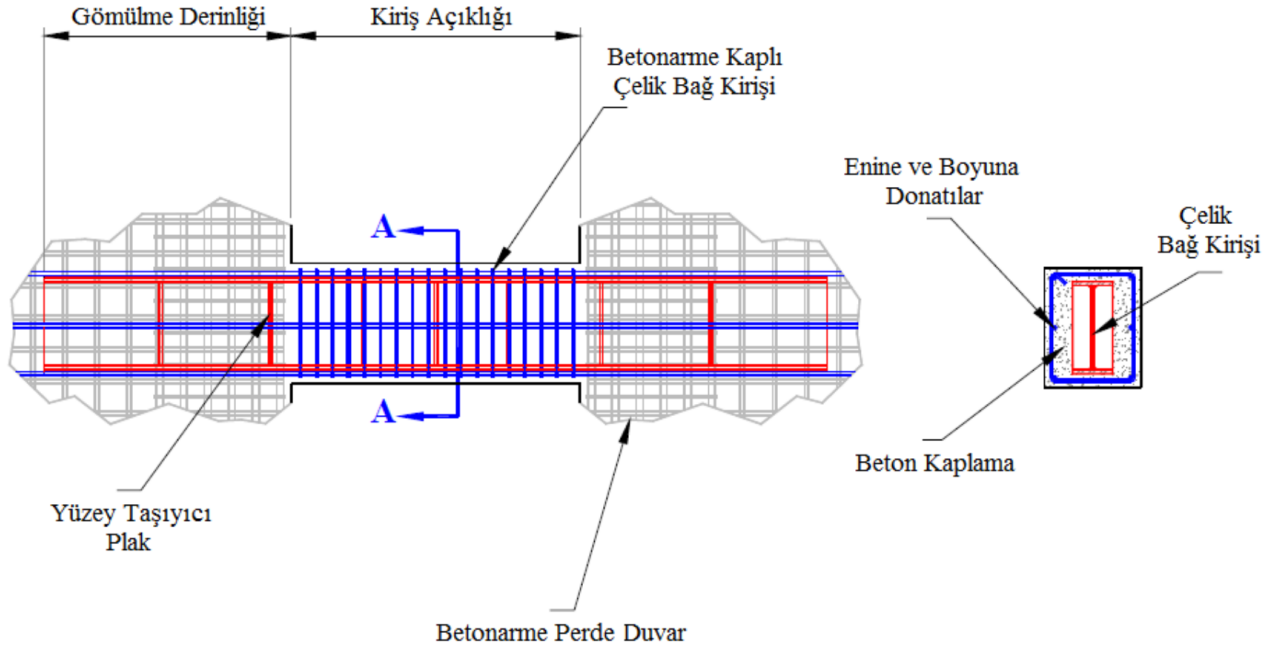
Şekil 3. TB DY (2018)'de Ba ğ Kirişlerinde Uygulanması Önerilen Çapraz Donatıların Şematik Gösterimi (TB DY, 2018)
(Schematic Representation of Diagonal Reinforcements Recommended to be Applied in Coupling Beams in TBEC (2018))

Literatürde deprem yönetmeliklerinin önerdiği çapraz donatıların alternatifi olabilecek birçok çalışma yapılmıştır. Çok sık donatıların kullanıldığı ba ğ kirişlerinde, etriyelerle sarılmış çapraz donatıların perdelerle mesnetlenmesi oldukça zor bir uygulamadır. Bu zorluğun önüne geçebilmek için literatürde ba ğ kirişlerinde farklı donatılandırma modelleri üzerinde çalışılmıştır. Ba ğ kirişinin Şekil 4'teki gibi iki ayrı kiriş şeklinde etriyelerle sarıldığı model, donatıların bağlanması ve perde içine yerleşim kolaylığıyla dikkat çekicidir (Choi vd., 2018; Li vd., 2020).



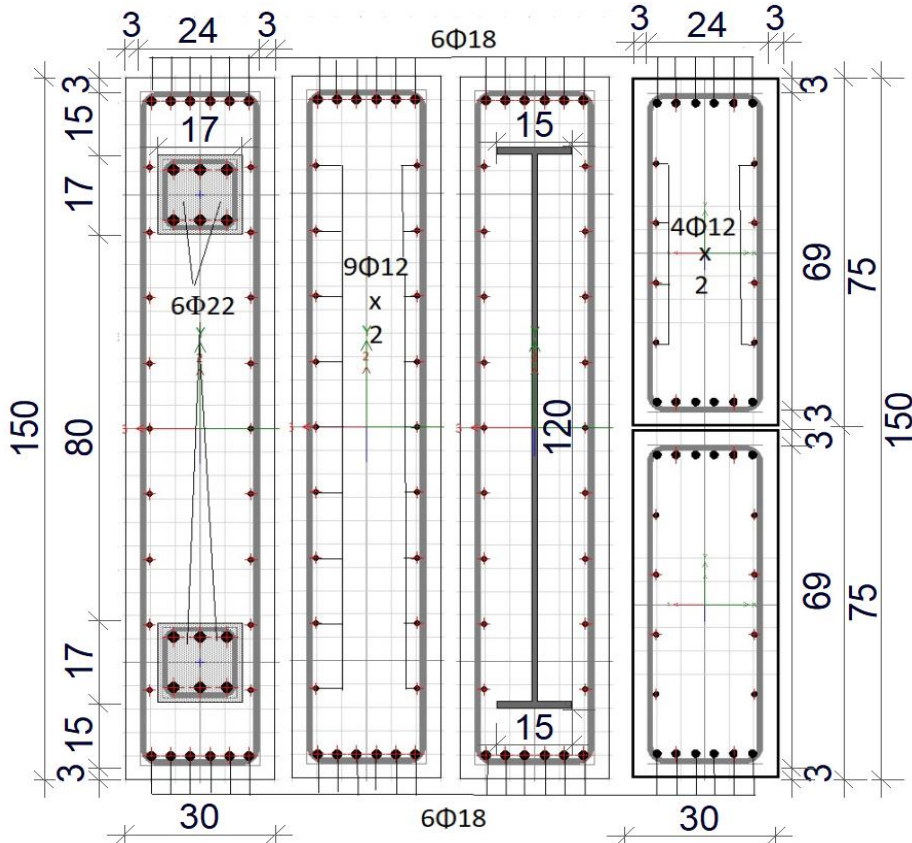
Şekil 4. Ba ğ Kirişlerinde Çift Kiriş Modeli (Choi vd., 2018) (Double Beam Model on Coupling Beams)

Ba ğ kirişlerinde, büyük zorlanmaların olduğu durumlarda, yüksek mukavemet ihtiyacını karşılamak için çapraz donatılı ba ğ kirişlerinin yerini alabilecek modeller araştırılmış ve Şekil 5'te gösterildiği gibi düz donatılı ba ğ kirişlerinin çekirdek kısmına yerleştirilen çelik profillerle oluşturulan kompozit ba ğ kiriş modelleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır (Fortney, 2005). Yapılan bu çalışmalar sonucunda, kompozit ba ğ kirişleri, çapraz donatılı ba ğ kirişinin alternatifi olabileceği kanısına varılmıştır (Chairunnisa vd., 2017).



Şekil 5. Kompozit Bağ Kirişi Modeli (Fortney, 2005) (Composite Coupling Beam Model)

Analiz modelinde kullanılacak bağ kirişi modelleri seçilirken literatürde kabul görmüş modellemeler tercih edilmiştir. Tüm bağ kirişi modelleri 30×150 cm boyutunda, tüm etriyeler ise $\Phi 10/10$ cm aralığında seçilmiştir. Kompozit kesitte kullanılan I profilin alt ve üst kesiti 15 cm genişliğinde ve 1.5 cm kalınlığında, gövde genişliği ise 1 cm'dir. I profilin yüksekliği 120 cm olarak seçilmiştir. Bu kadar yüksek bir profil kullanılmasında ilk sebebi 150cm yüksekliğindeki bağ kirişinde yer alması diğer sebebi ise bağ kirişinin dayanımını önemli ölçüde artırıp yapı performansına olan etkilerini incelemektir. Tüm modellerde alt ve üst donatılar $6\Phi 18$, gövde donatısı olarak ise $2 \times 9\Phi 12$ tercih edilmiştir. Çapraz donatıların kullanıldığı kesitte ise çapraz donatılar $6\Phi 22$ seçilmiş, donatılar 16 cm genişlik ve yükseklikteki etriyeler ile sarılmıştır. Çift kiriş şeklinde donatıların kullanıldığı kesitte ise alt ve üst donatı olarak $6\Phi 18$ seçilmiş gövde donatısı olarak ise $2 \times 4\Phi 12$ tercih edilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Analiz Modelinde Kullanılan Bağ Kirişi Modelleri (cm) (Coupling Beam Models Used in the Analysis Model)

3.2. Analiz Modeli (Analysis Model)

Analiz yöntemleri TBDY (2018)'de dayanıma göre tasarım (DGT) ve şekildeğiştirmeye göre değerlendirme ve tasarım (ŞGDT) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. DGT'de doğrusal analiz yöntemleri, ŞGDT'de ise doğrusal olmayan analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Analiz modellerinin ön tasarımları İdestatik v10 (ideYAPI, 2020) analiz programıyla ve DGT yöntemiyle yapılmıştır. DGT yöntemiyle bulunan donatılar kullanılarak taşıyıcılar modellenmiş ve yapının doğrusal olmayan analizleri ETABS v18 programı yardımıyla yapılmıştır (ETABS, 2020).

TBDY (2018)'le beraber her bir koordinatın kendine ait deprem parametreleri bulunmaktadır. Bu çalışmada İstanbul Atatürk Havaalanı'nın bulunduğu koordinatların deprem parametreleri kullanılmıştır (Tablo 2). Tablo 1'deki S_s kısa periyot harita spektral ivme katsayısını, S_1 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısını, S_{D1} 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısını, S_{DS} kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısını, T_A ve T_B ise yatay elastik tasarım ivme spektrumunun iki köşe periyodunu simgelemektedir. Analiz modeli parametreleri ise Tablo 3'te verilmiştir

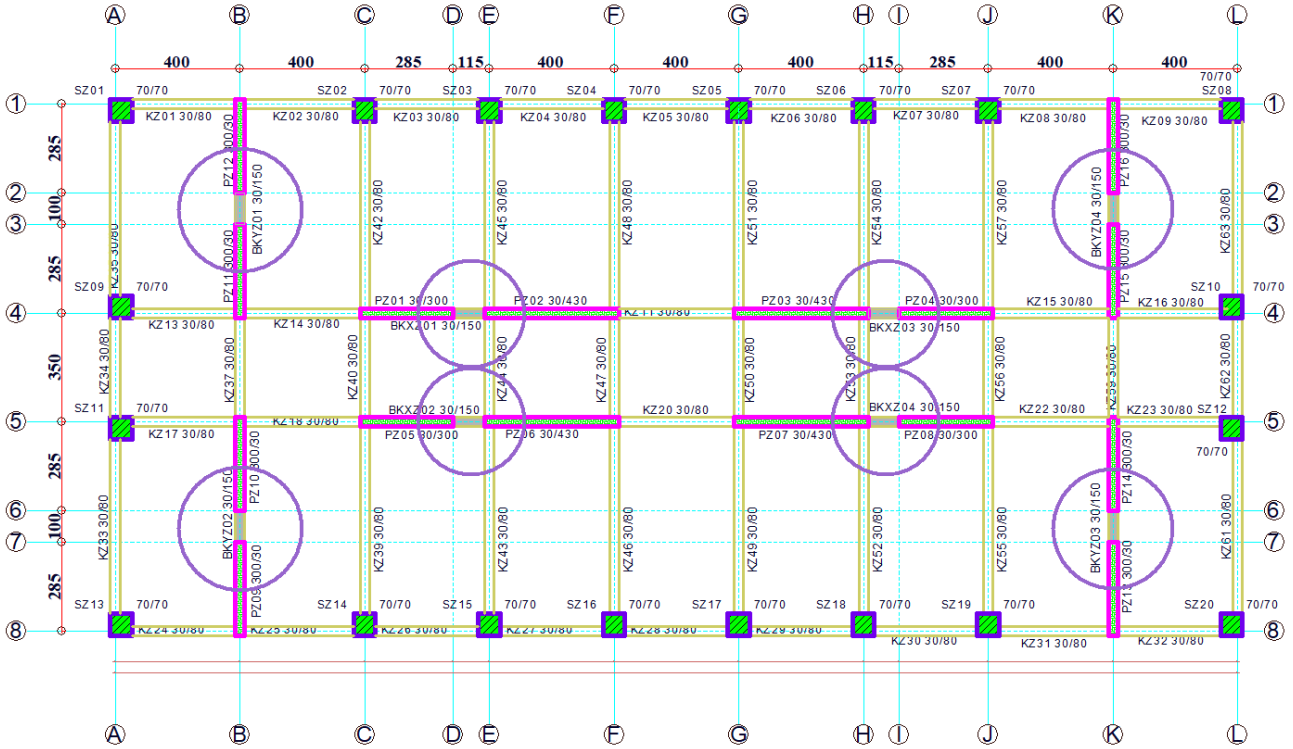
Tablo 2. Analiz Modelinin Lokasyon ve Deprem Parametreleri (Location and Earthquake Parameters of the Analysis Model)

Analiz Modeli Lokasyonu	İstanbul Atatürk Havaalanı
Bina Konumu Enlem	40.982214
Bina Konumu Boylam	28.828068
S_s	1.218
S_1	0.325
S_{D1}	0.488
S_{DS}	1.262
T_A	0.067
T_B	0.334
Periyot (Mod 1 - Y Yönü) (sn)	1.5765
En Büyük Yer İvmesi PGA (g)	0.501
En Büyük Yer Hızı PGV(cm/sn)	33.574

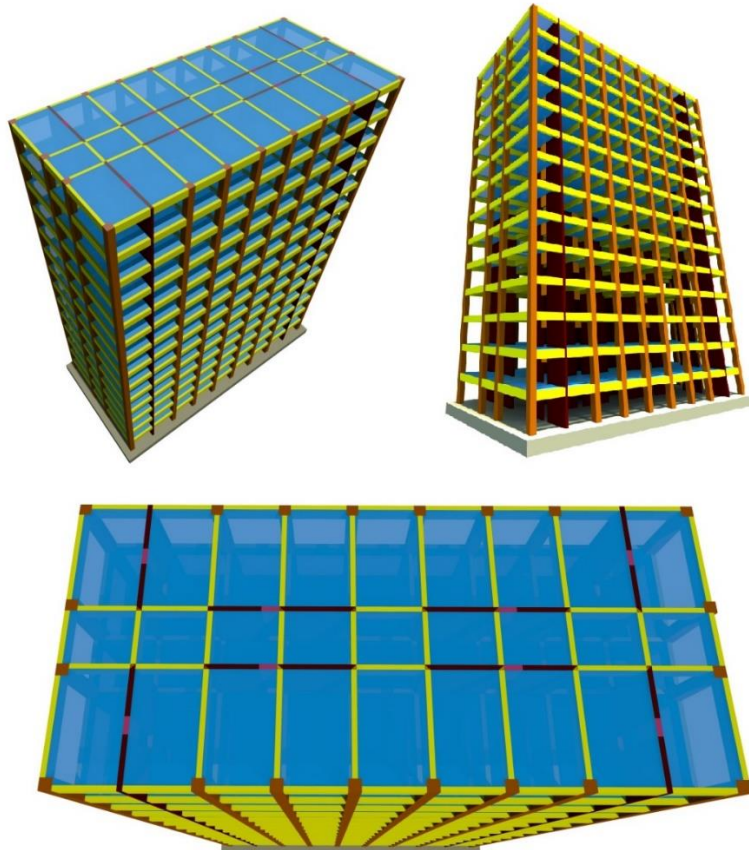
Tablo 3. Analiz Modeli Genel Parametreleri (Analysis Model General Parameters)

Analiz Modeli Parametreleri			
Genel Parametreler		Taşıyıcı Sisteme Ait Parametreler	
Kat Sayısı	14	Perde Kalınlığı	30 cm
Kat Yüksekliği	3.5 m	Perde Uç Düşey Donatı-Etr.	11Φ18 Φ12/11
Yapı Ebatları	36 m x 16.9 m	Perde Gövde Donatı-Etr.	Φ18/17 Φ10/10
Yapı Yüksekliği	49 m	Kolon Kesiti	70 x 70 cm
Bina Yükseklik Sınıfı	BYS 3	Kolon Donatısı- Etriye	16Φ20 Φ10/10 Etr
Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı R	8	Kiriş Kesiti	30 x 80
Dayanım Fazlalığı Katsayısı D	2.5	Kiriş Donatısı -Etriye	5Φ18 - Üst 5Φ18 - Alt Φ10/10 Etr.
Beton Sınıfı	C40	Deprem Tasarım Sınıfı	DTS 1
Çelik Sınıfı	B420C		
Bina Kullanım Sınıfı	BKS 3	Döşeme Kalınlıkları	15 cm
		Döşeme Ölü / Hareketli Yük	2,06 / 3,43 kN/m ²
		Yapı Toplam Ağırlığı (G+0.3Q)	116121 kN
Yapı Süneklik Düzeyi	Yüksek	Hesap Yöntemi	ŞGDT
		Zemin Sınıfı	ZC

Yapılan bu çalışmada, deprem yükleri kolon ve kirişlerin oluşturduğu çerçeveler ile bağ kirişli perdeler tarafından birlikte karşılanmaktadır. Taşıyıcıların boyutları, tüm katlarda aynı seçilmiştir. Şekil 7'de kat planı verilen analiz modelinde bağ kirişleri daire içine alınmıştır. Ayrıca analiz modelinde bağ kirişli perdeler, kolon ve kirişlerden oluşan çerçeveler kat içinde homojen dağılım göstermektedir. Analiz modellerinin 3 boyutlu görüntüsü ise Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Analiz Modeli Kat Planı (Floor Plan of Analysis Model)



Şekil 8. Analiz Modelinin 3 Boyutlu GörSELLERİ (3D Views of the Analysis Model)

3.3. Doğrusal Olmayan Analiz (Nonlinear Analysis)

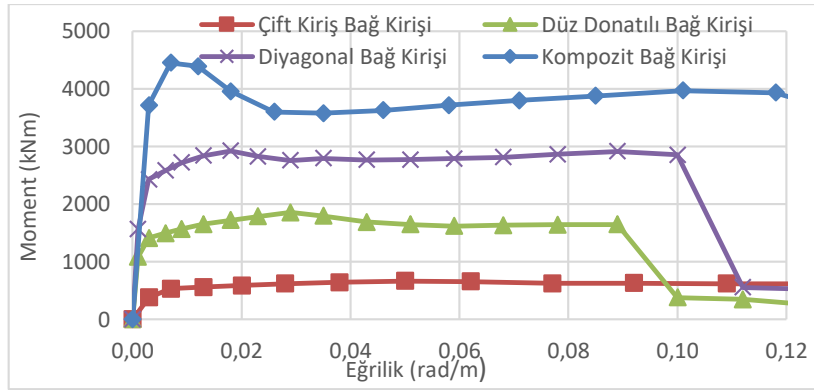
Bu çalışmada doğrusal olmayan analizde, iki farklı mafsal modellemesi kullanılmıştır. Bunlardan birincisi çubuk elemanlar olan kolonlarda, çerçeve kirişlerinde ve bağ kirişlerinde kullanılan yığılı mafsal modeli, ikincisi ise kabuk eleman olan perdelerde kullanılan yayılı mafsal modelidir.

Yığılı mafsal modellemeleri yapılırken, DGT yöntemiyle analizi yapılan ve donatıları seçilen taşıyıcı elemanların, moment eğrilik grafikleri elde edilmiştir (Şekil 9-10-11). Şekil 12’de verilen yapı elemanlarının Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Öncesi (GÖ) kesit hasar sınırları ise TBDY (2018)’de önerildiği şekilde, Eşitlik (5)-(6) ve (7)’den faydalanılarak bulunmuştur (Şekil 13). Eşitlik (5)-(6) ve (7)’de geçen θ_p ilgili performans düzeyi için izin verilen plastik dönme sınırını, Φ_u göçme öncesi eğriliği, Φ_y akma eğriliğini, L_p plastik mafsal boyunu, L_s kesme açıklığını, d_b boyuna donatı çapını sembolize etmektedir.

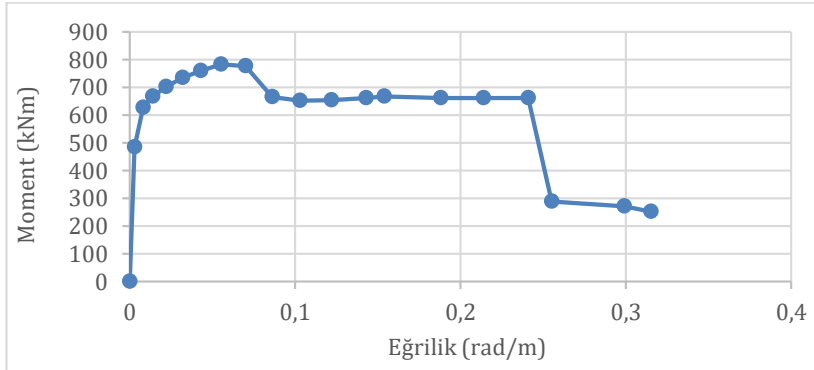
$$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left[(\Phi_u - \Phi_y) L_p \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4.5 \Phi_u d_b \right] \quad (5)$$

$$\theta_p^{(KH)} = 0.75 \theta_p^{(GÖ)} \quad (6)$$

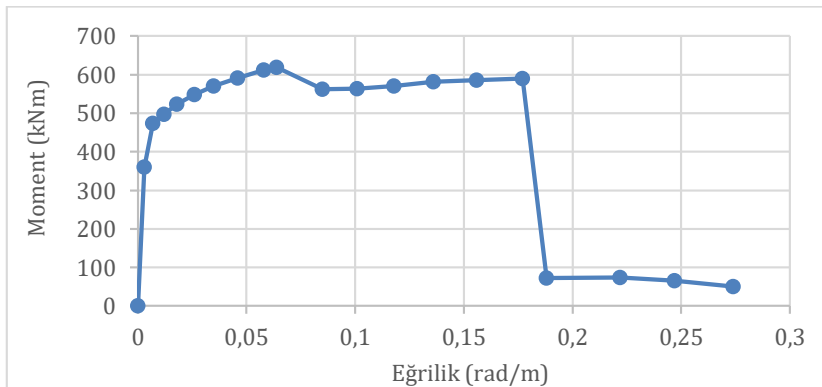
$$\theta_p^{(SH)} = 0 \quad (7)$$



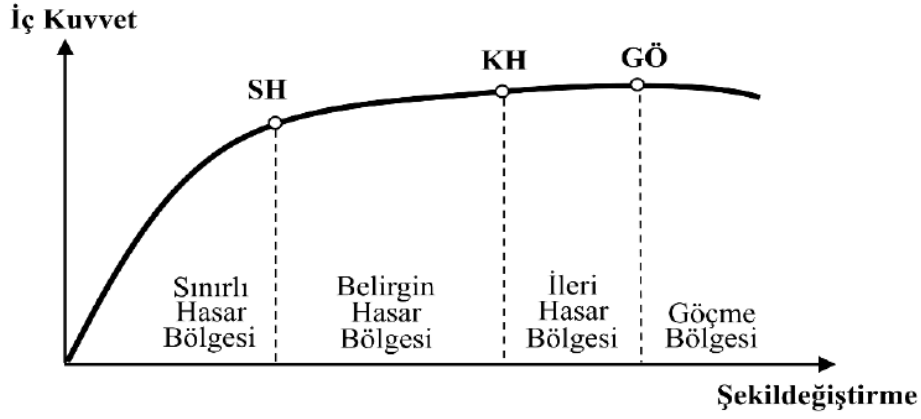
Şekil 9. Bağ Kirişleri Moment-Eğrilik Grafikleri (Coupling Beams Moment Curvature Graphics)



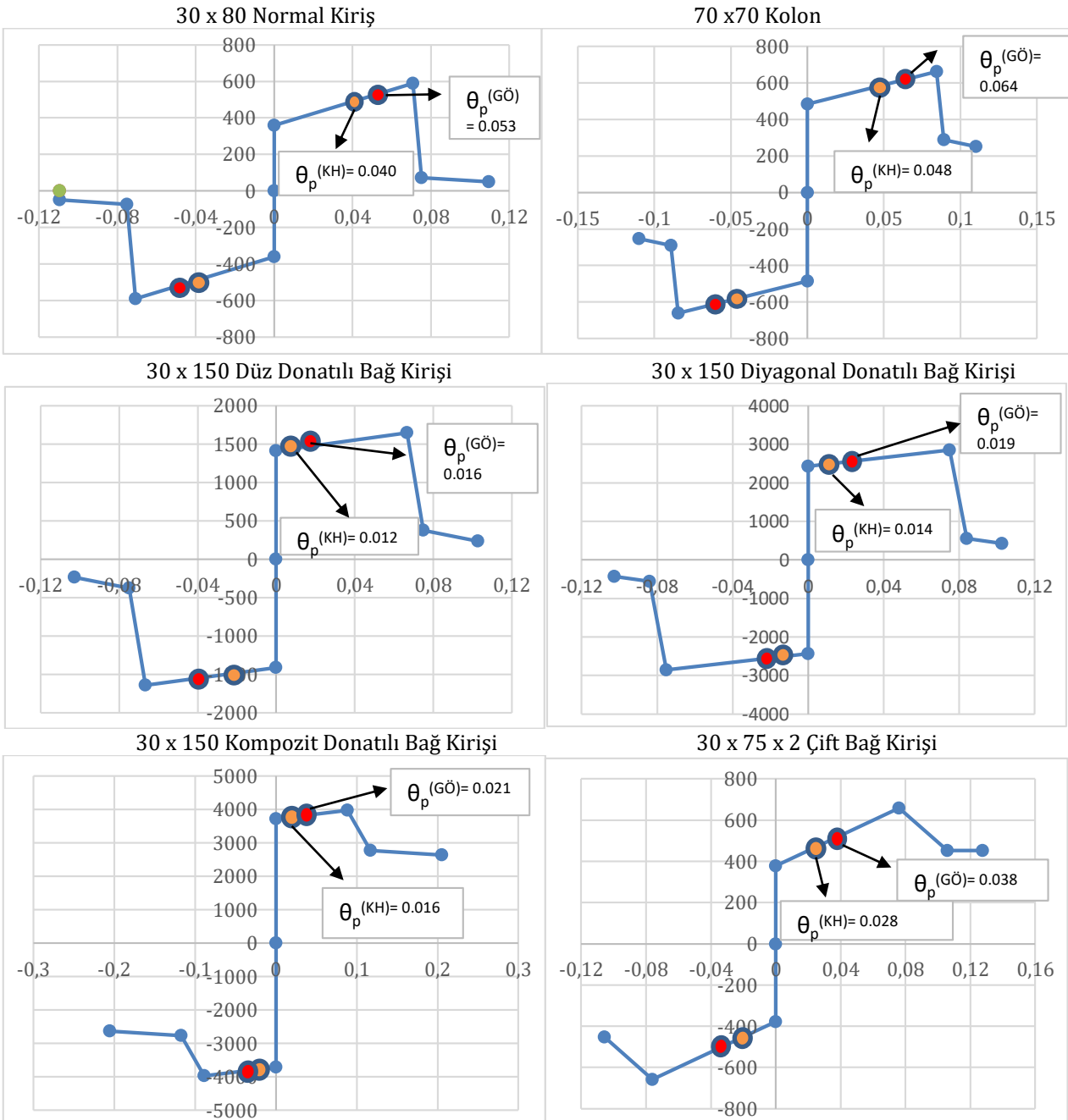
Şekil 10. 70 x 70 Kolon Moment-Eğrilik Grafikleri (70 x 70 Column Moment-Curvature Graphics)



Şekil 11. 30 x 80 Çerçeve Kirişi Moment-Eğrilik Grafikleri (30 x 80 Frame Beam Moment-Curvature Graphics)



Şekil 12. Kesit Hasar Bölgeleri (TBDY, 2018) (Limits of Damage in Construction Elements)



Şekil 13. Yiğilli Mafsallar Moment - Dönme Eğrileri ve KH-GÖ Noktaları (kNm) (Plastic Hinges Moment - Rotation Curves and LS (Life Safety)-CP (Collapse Prevention) Points)

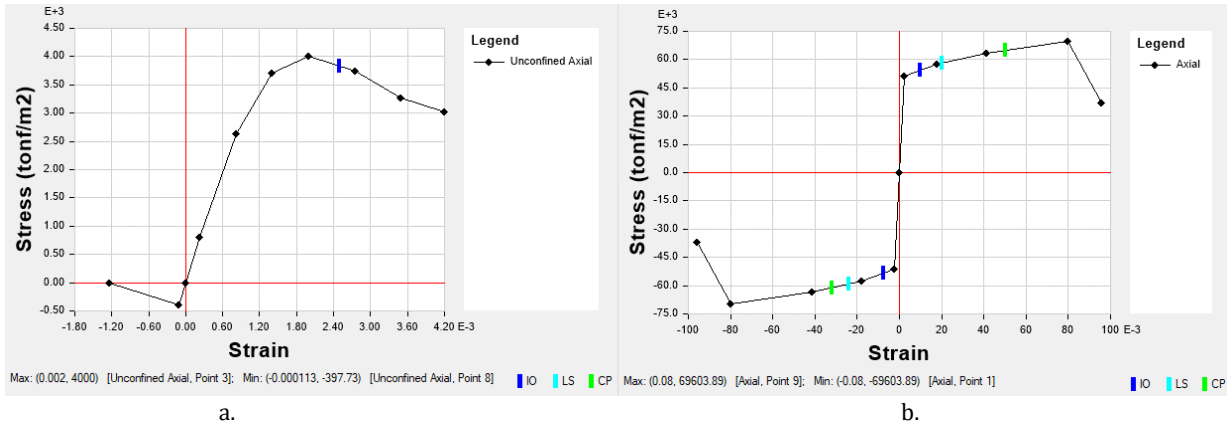
Perdelerde kullanılan yayılı mafsal modellemesi ise TBDY (2018) 5.8.1.1'e göre yapılmıştır. Yayılı plastik davranış modeline göre hesaplanan beton ve donatı çeliği toplam birim şekildeğiştirmeleri $\varepsilon_c^{(GÖ)}$ ve $\varepsilon_s^{(GÖ)}$ için izin verilen sınırlar Eşitlik (8)-(9)- (10)ve(11)'e göre elde edilmiştir. Eşitlik (8)-(9)- (10) ve (11)'de geçen ε_c ilgili performans düzeyi için izin verilen sargılı beton birim kısalması sınırını, ω_{we} etkin sargı donatısının mekanik donatı oranını, ε_s ilgili performans düzeyi için izin verilen donatı çeliği birim şekildeğiştirmesi sınırını sembolize etmektedir. Etabs v18'de yayılı mafsal modellemesinde kullanılan beton ve çelik gerilme-şekildeğiştirme grafikleri ise Şekil 14'te gösterilmiştir.

$$\varepsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.04\sqrt{\omega_{we}} \leq 0.018 \quad (8)$$

$$\varepsilon_s^{(GÖ)} = 0.4 \varepsilon_{su} \quad (9)$$

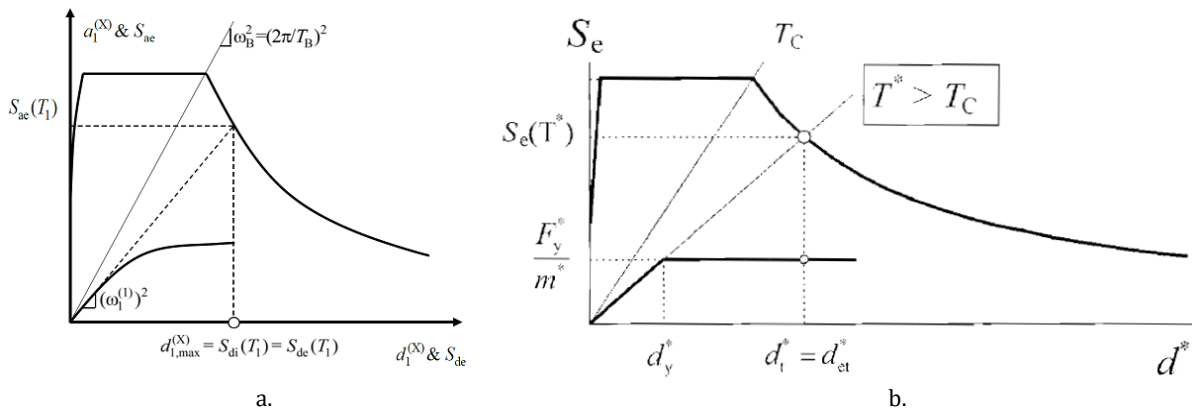
$$\varepsilon_c^{(KH)} = 0.75 \varepsilon_c^{(GÖ)} \quad (10)$$

$$\varepsilon_s^{(KH)} = 0.75 \varepsilon_s^{(GÖ)} \quad (11)$$



Şekil 14. Yayılı Mafsal Gerilme – Şekildeğiştirme Eğrileri ve Kontrollü Hasar (KH) – Göçme Öncesi (GÖ) Noktaları (Fiber Hinges Stress - Strain Curves and Life Safety (LS) – Collapse Prevention (CP) Points
a. Beton b. Donatı Çeliği (a. Concrete b. Steel)

Çalışmada statik itme yöntemiyle yapılan doğrusal olmayan analizler sonucunda, analiz modelinin performans noktaları hem Eurocode B.4 bölümünde, hem de TBDY (2018) 5B.3. bölümünde yer alan yapı yer değiştirme talebi formüllerinden yararlanılarak hesaplanmıştır (Eurocode8, 2004). Şekil 15'e göre hesaplanan hedef yer değiştirme talebinin statik itme analizinde karşılık gelen hesap adımına göre yapı performansı belirlenmiştir.



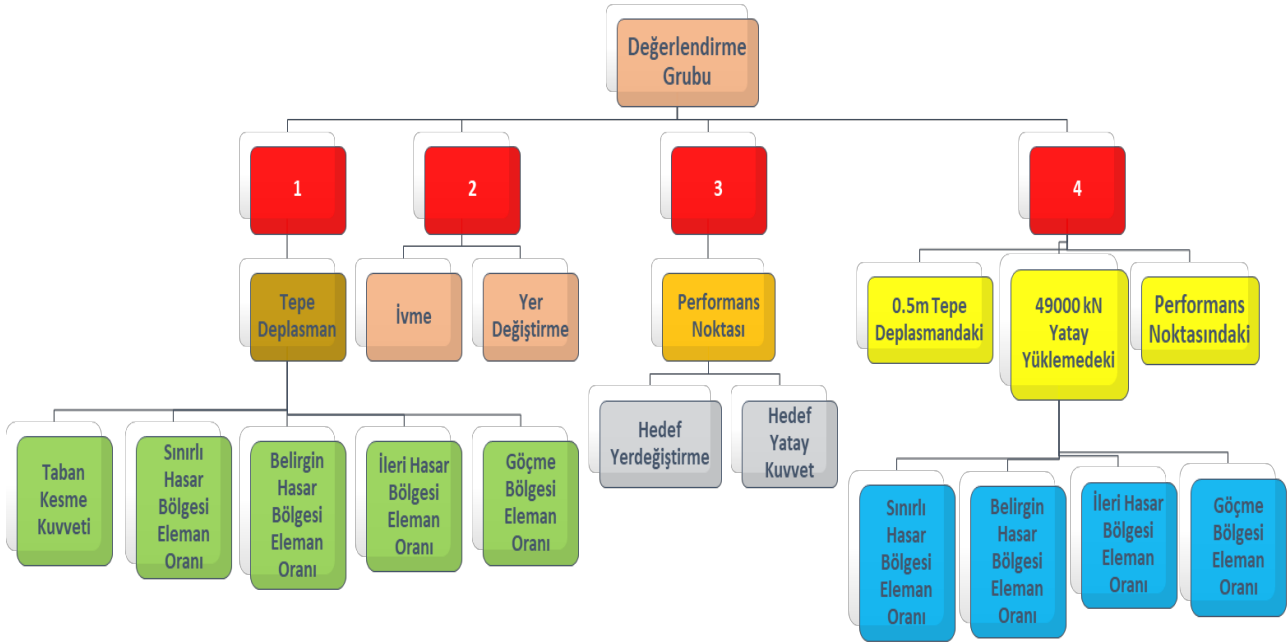
Şekil 15. TBDY (2018) ve Eurocode 8'de Performans Noktası Grafikleri (TBEC (2018) and Eurocode 8 Performance Point Graphics)

a. TBDY (2018) Şekil 5B.3. b. Eurocode 8 Şekil B.2 (TBEC (2018) Figure 5B.3. b. Eurocode 8 Figure B.2)

4. Analitik Sonuçlar (Analytical Results)

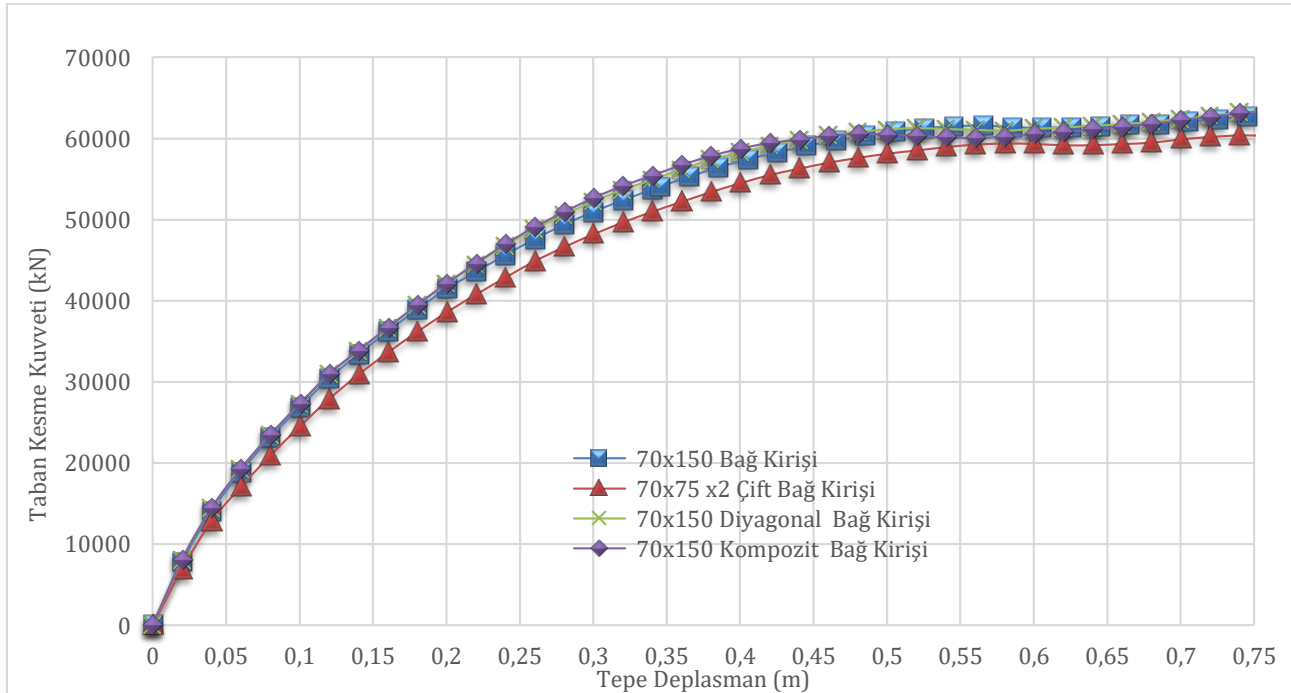
Bu çalışmada 14 katlı, deprem etkileri, kolon ve kirişlerin oluşturduğu çerçeveler ile bağ kirişli perdeler tarafından birlikte karşılandığı analiz modeli, TBDY (2018) 5.6'da bahsedildiği şekilde statik itme analizleri yapılmıştır. Bulunan analiz sonuçları, normal donatılı model, çapraz donatılı model, betonarme ve çeliğin bir arada kullanıldığı

kompozit model ve çift kiriş model olmak üzere 4 farklı bağ kirişi modelleri için, Şekil 16'daki gösterildiği gibi 4 ana değerlendirme başlığı altında ayrıntılı şekilde incelenmiştir.



Şekil 16. Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırma Başlıkları (Comparison Titles of Nonlinear Analysis Results)

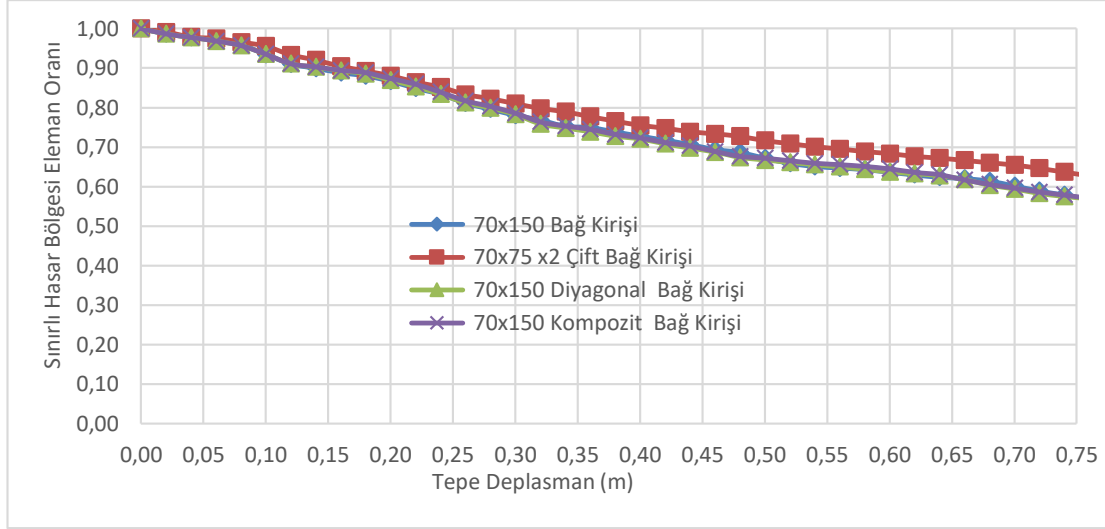
1. Değerlendirme grubundaki analiz sonuçları incelenirken ilk önce taban kesme kuvveti - tepe deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. Tüm analiz modellerinin performans noktası 0.15m tepe deplasman değerleri civarında hesaplandığı için statik itme analizleri, performans noktası tepe deplasman değerinin 5 katı bir değer olan 0.75m de sonlandırılmıştır. Yapı güç tükenme durumları daha yüksek deplasmanlarda gerçekleştiği için grafikte ani bir düşüş gözükmemektedir. Deprem yüklerinin betonarme perdeler ve çerçeveler tarafından karşılandığı yapılarda, bağ kirişi modellerindeki değişiklik yapının taban kesme kuvveti - tepe deplasman değerlerinde ciddi farklılıklara yol açmamışsa da çift bağ kirişi modeli diğer modellerle aynı tepe deplasmana daha düşük taban kesme kuvvetinde ulaşmıştır. (Şekil 17).



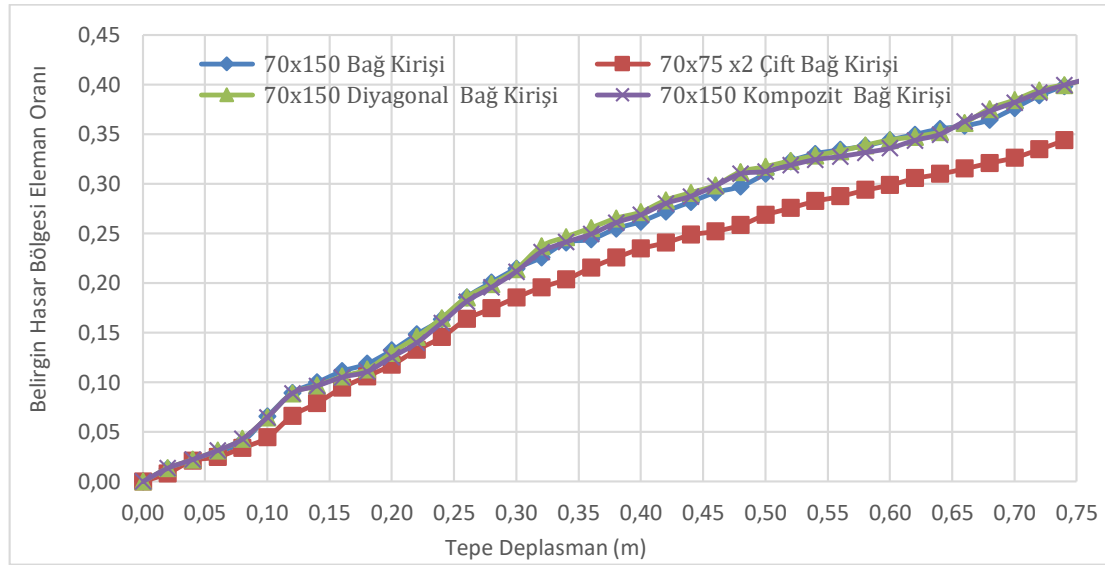
Şekil 17. Taban Kesme Kuvveti - Tepe Deplasman Grafiği (Base Shear - Monitored Roof Displacement Graph)

Sınırlı hasar bölgesindeki eleman oranları incelendiğinde, çift bağ kirişi modelinin, 75 cm tepe deplasmanı yaptığı anda, elemanlarının %63'ü sınırlı hasar bölgesinde kaldığı görülmüştür. Diğer modeller ise aynı tepe

deplasmana ulaştığında elemanlarının %57'si sınırlı hasar bölgesindeki kalabilmiştir (Şekil 18). Belirgin hasar bölgesindeki eleman oranları incelendiğinde ise çift bağ kirişi modelinin, 75 cm tepe deplasmanı yaptığında, elemanlarının %35'i belirgin hasar bölgesinde olduğu diğer modellerin ise aynı tepe deplasmanda elemanlarının %40'ının belirgin hasar bölgesinde olduğu görülmüştür (Şekil 19).

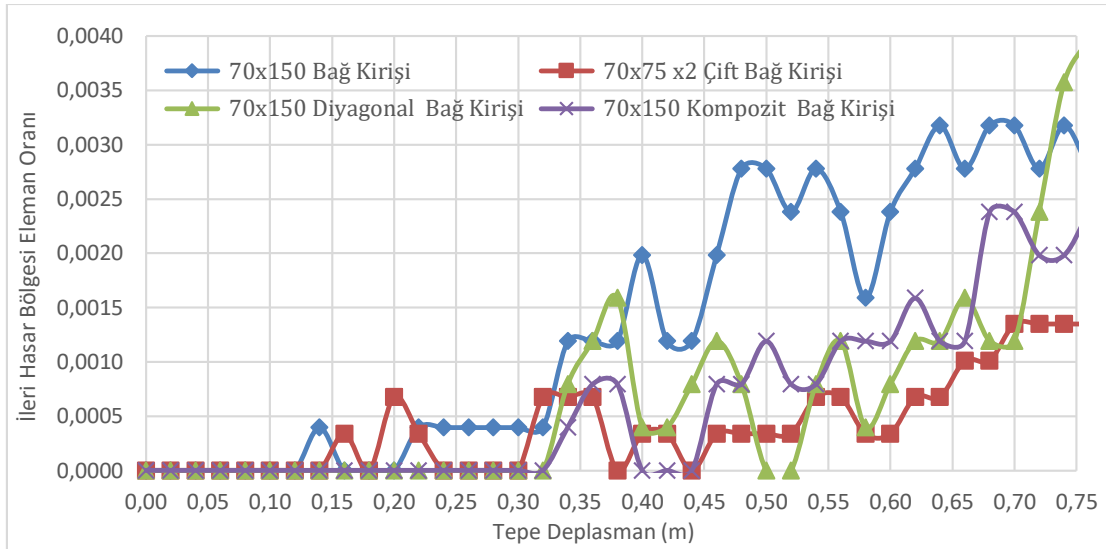


Şekil 18. Sınırlı Hasar Bölgesi Eleman Oranı - Tepe Deplasman Grafiği (Minimum Damage Region Element Ratio - Monitored Roof Displacement Graph)

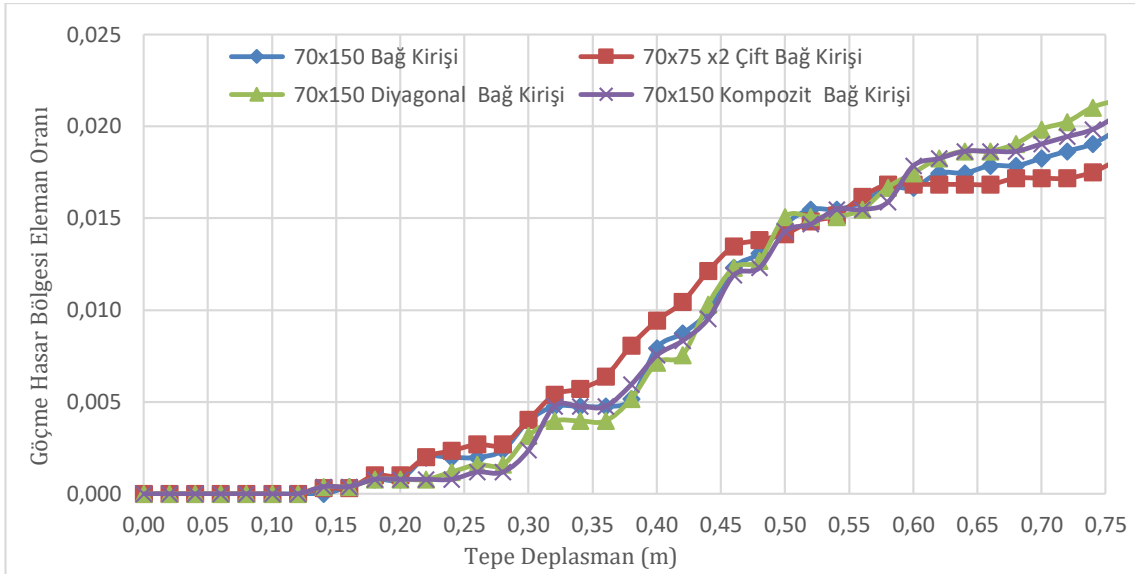


Şekil 19. Belirgin Hasar Bölgesi Eleman Oranı - Tepe Deplasman Grafiği (Marked Damage Region Element Ratio - Monitored Roof Displacement Graph)

İleri hasar bölgesi eleman oranları incelendiğinde 0,3 - 0,7m tepe deplasman aralığında düz donatılı modelin diğer modellerden daha fazla elemanının ileri hasar bölgesine geçtiği görülmüştür (Şekil 20). Göçme bölgesi eleman oranları incelendiğinde ise çift bağ kirişi modelinin başlangıçta daha fazla elemanının göçme bölgesine geçtiği görülse de 0,6m tepe deplasmandan sonra diğer modellerin göçme bölgesine geçen eleman sayısı çift bağ kirişi modelinden fazla olmuştur (Şekil 21).

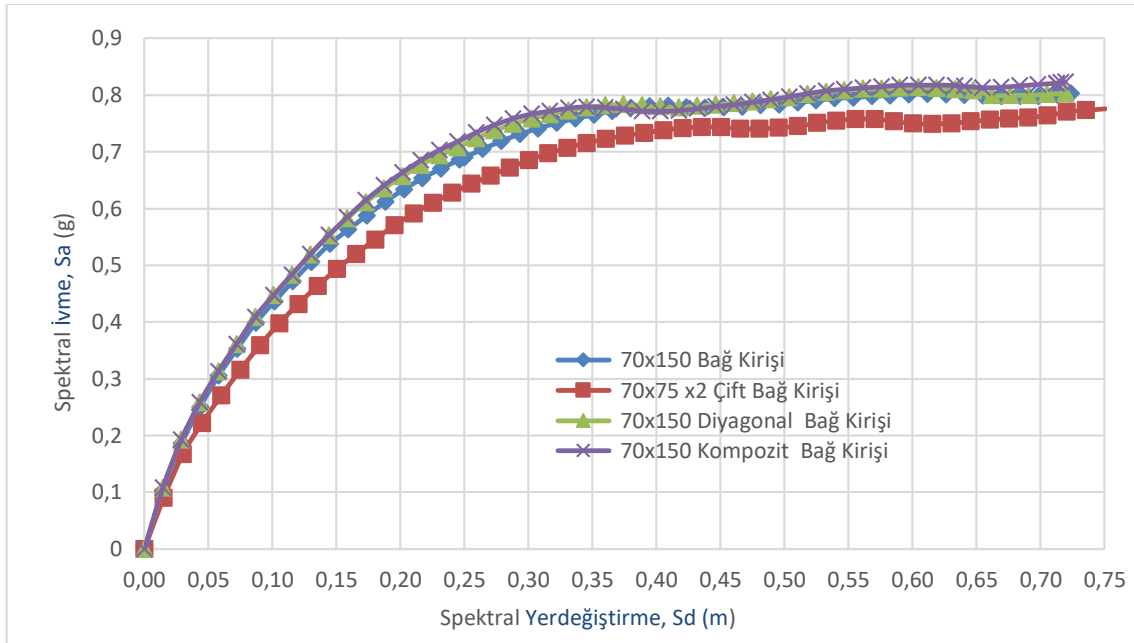


Şekil 20. İleri Hasar Bölgesi Eleman Oranı – Tepe Deplasman Grafiği (Advanced Damage Region Element Ratio – Monitored Roof Displacement Graph)



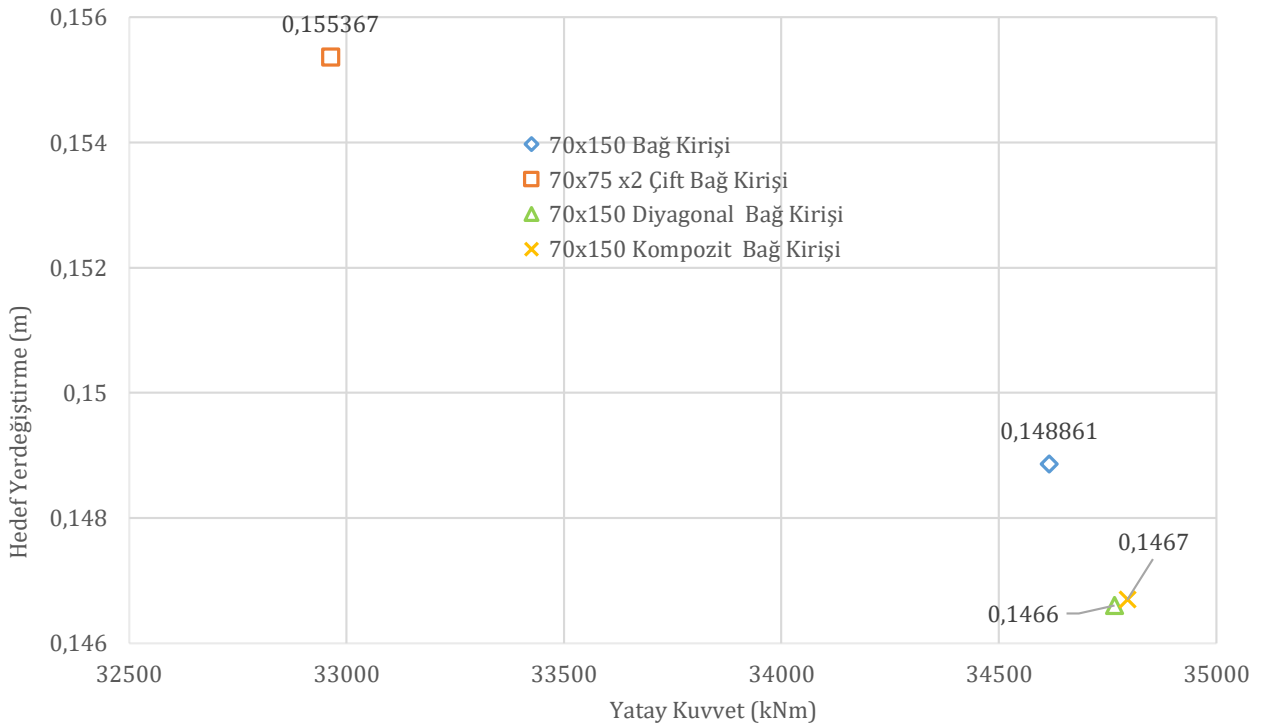
Şekil 21. Göçme Hasar Bölgesi Eleman Oranı – Tepe Deplasman Grafiği (Collapsing Region Element Ratio – Monitored Roof Displacement Graph)

Bir diğer araştırma başlığı olan spektral ivme – spektral yerdeğiştirme grafikleri 2. değerlendirme başlığı altında incelenmiştir. Şekil 22 incelendiğinde, çift bağ kirişi modelinin diğer modellerle aynı yerdeğiştirmeyi daha düşük spektral ivmelerde yaptığı görülmektedir. Kompozit bağ kirişi modeli ise diğer modellerle aynı spektral yerdeğiştirmeye daha yüksek spektral ivmelerde ulaşmıştır.



Şekil 22. Spektral İvme – Spektral Yerdeğiştirme Grafiği (Spectral Acceleration – Spectral Displacement Graph)

Yapı performansının belirlenmesi için TBDY (2018) 5B.3.'e göre her bağ kirişi modeli için hedef yerdeğiştirme değerleri bulunmuştur. 3. değerlendirme başlığında analiz modellerinin yapı performans noktasındaki hedef yerdeğiştirme ve hedef yatay kuvvet değerleri verilmiştir (Şekil 23). Sonuçlar incelendiğinde, kompozit ve diyagonal donatılı modelinin yatay yük taşıma kapasitesinin daha yüksek olduğu, çift bağ kirişli modelin ise diğer modellere göre daha yüksek hedef yerdeğiştirme değerine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 23. Bağ Kirişi Modellerinin Performans Noktasındaki Hedef Yerdeğiştirme – Yatay Kuvvet Değerleri (Coupling Beam Models' Performance Point Target Displacement – Horizontal Force Values)

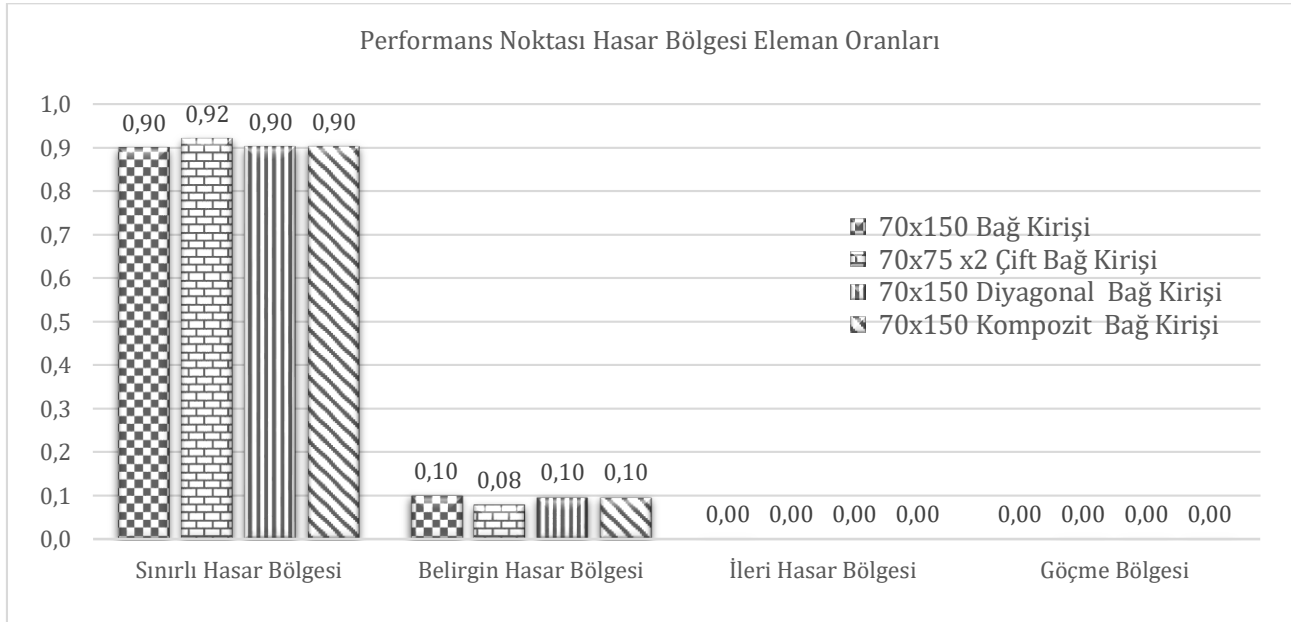
4. değerlendirme grubunda tüm bağ kirişi modellerinin performans noktasındaki hasar bölgesi eleman oranlarının yanında çok ciddi yatay yüklemeler altındaki davranışını inceleyebilmek adına yapı toplam ağırlığının yaklaşık 0.42 katına denk gelen 49000 kN yatay yükleme altındaki hasar bölgesi eleman oranları incelenmiştir. Ayrıca bu değerlendirme grubunda analiz modellerin büyük yerdeğiştirmeler altındaki davranışını inceleyebilmek adına

yapı yüksekliğinin yaklaşık %1'ine denk gelen 0.5m tepe deplasman değerindeki hasar bölgesi eleman oranları ile incelenmiştir.

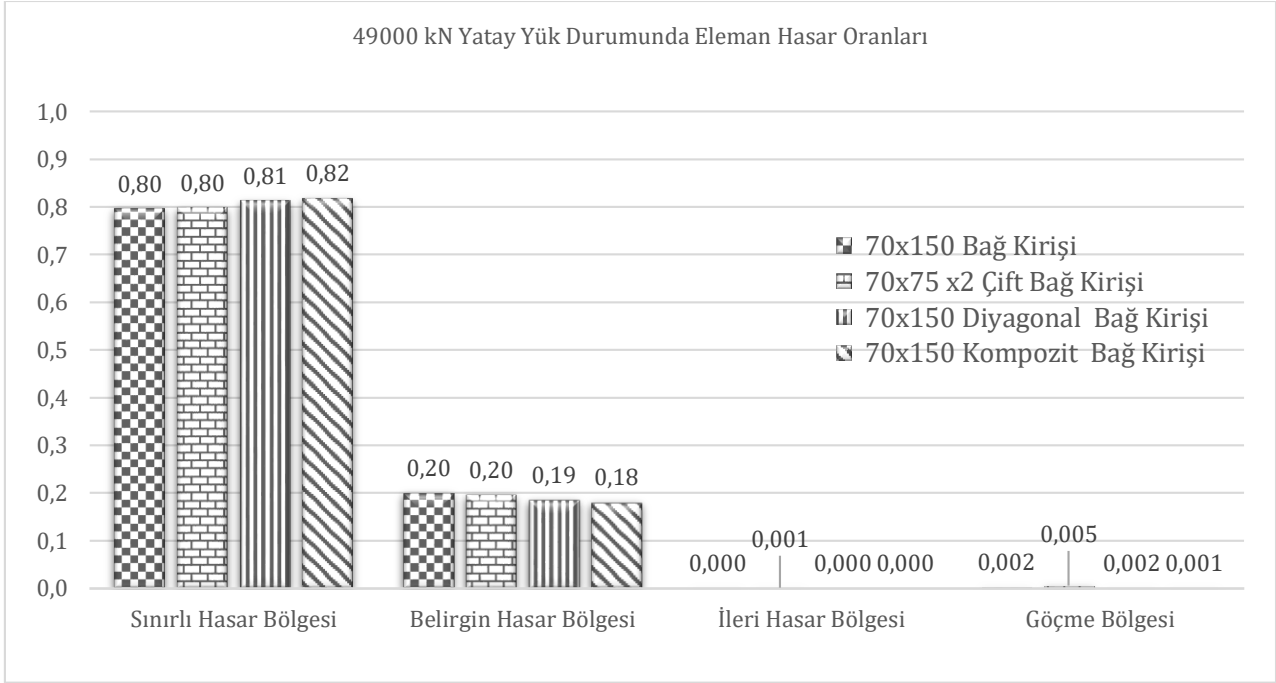
Performans noktasında, çift bağ kirişi modelinin elemanlarının %92'si sınırlı hasar bölgesinde kalmıştır. Bu oran diğer bağ kirişi modellerinde ise %90 seviyesinde kalmıştır. Ayrıca performans noktasında hiçbir modelin ileri ve göçme hasar bölgesinde elemanı bulunmamaktadır (Şekil 24).

Çift bağ kirişi modelinin performans noktasındaki yatay kuvvet kapasitesi 32962 kN iken diğer bağ kirişlerinin hedef yatay kuvvet değeri 34335 kN civarında olduğu 3. değerlendirme grubunda görülmüştür. Bu değer yapı toplam ağırlığının %30'undan daha az bir değere tekabül etmektedir. Bu sebeple analiz modellerinin ciddi yatay yüklemeye altındaki davranışlarını incelemek için yapı modellerine, yapı toplam ağırlığının yaklaşık %42'sine tekabül eden 49050 kN yatay yüklemeye uygulanmış ve analiz modellerinin davranışları incelenmiştir. Şekil 25 incelendiğinde kompozit bağ kirişi modelinin %82'sinin sınırlı hasar bölgesinde kaldığı görülmüştür. Göçme bölgesi eleman oranları incelendiğinde ise en fazla göçme bölgesine toplam elemanlarının %0.5'i ile çift bağ kirişi modelinin elemanlarının geçtiği görülmüştür. Bu değer kompozit modelde ise %0.1'de kalmıştır.

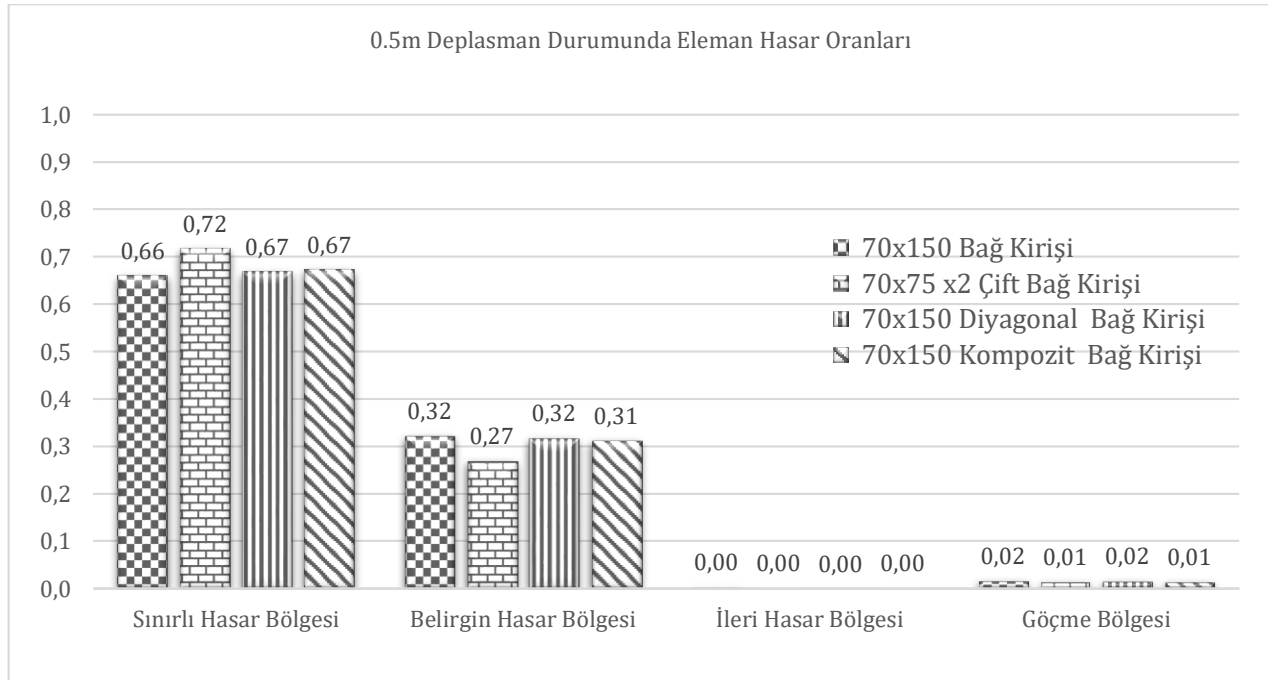
Analiz modellerinin hedef yerdeğiştirme değerlerinin 0.15m civarında olduğu 3. değerlendirme grubu incelendiğinde görülmüştür. Bu değer analiz modellerinin toplam yüksekliğinin %0.3'üne denk gelmektedir. Analiz modellerinin büyük yerdeğiştirmelerdeki davranışını incelemek için yapı toplam yüksekliğinin %1'ine denk gelen 0.5m yatay yerdeğiştirme durumu Şekil 26'da incelenmiştir. 0.5m'lik tepe deplasman değerinde çift bağ kirişi modelinin %72'si sınırlı hasar bölgesinde kalmıştır. Bu oran diyagonal ve kompozit bağ kirişi modelinde %67, düz donatılı modelde ise %66'dır. Göçme bölgesindeki eleman oranları incelendiğinde, düz donatılı ve diyagonal bağ kirişi modellerinin %2'si göçme bölgesindeyken, çift bağ kirişi ve kompozit bağ kirişi modellerinde ise bu oran %1'dir. Çok büyük yerdeğiştirmeler ve yatay yüklemelerde ileri hasar bölgesi ve göçme bölgesine geçecek eleman sayısı artacaktır ancak 4. değerlendirme grubunda, performans noktası değerleri belli katsayılarla artırılarak tepe deplasman ve yatay yük durumlarının incelenmesi tercih edilmiştir. Bu sebeple analiz modellerinin Şekil 24-25 ve 26'da ileri hasar bölgesi ve göçme bölgesindeki eleman sayıları çok sınırlı kalmıştır.



Şekil 24. Performans Noktası Hasar Bölgesi Eleman Oranları (Performance Point Damage Area Element Ratios)



Şekil 25. 49000 kN Yatay Yük Durumunda Hasar Bölgesi Eleman Oranları (Damage Area Element Ratios at 49050 kN Horizontal Load)



Şekil 26. 0.5m Deplasman Durumunda Hasar Bölgesi Eleman Oranları (Damage Area Element Ratios at 0.5m Roof Displacement)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Yapılan bu çalışmada, deprem etkilerinin kolon ve kirişlerin oluşturduğu çerçeveler ile bağ kirişli perdeler tarafından birlikte karşılandığı yapılarda bağ kirişi modellerinin yapı performansına olan etkileri incelenmiştir. TBDY (2018)'de geçen çapraz donatılı ve normal donatılı bağ kirişlerinin yanında literatürde kendine yer edinmiş, çift kiriş şeklinde donatılandırılan ve I profil ile güçlendirilmiş kompozit modeller 4 farklı değerlendirme başlığı altında incelenmiştir. Yapılan doğrusal olmayan analizler ışığında elde edilen sonuçlar ise şu şekilde özetlenebilir:

- Taban kesme kuvveti – tepe deplasman grafiği incelendiğinde 4 farklı bağ kirişi modelinde de birbirine yakın değerler görülmüştür.
- Çift bağ kirişi modelinin, 75 cm tepe deplasmanı yaptığında, elemanlarının %63'ü sınırlı hasar bölgesinde kaldığı görülmüştür. Diğer modeller ise aynı tepe deplasmana diğer modeller ulaştığında elemanlarının %57'si

sınırlı hasar bölgesindeki kalabilmiştir. Göçme bölgesi eleman oranların incelendiğinde ise 0.5m tepe deplasman değerine kadar çift bağ kirişi modelinin daha fazla elemanın göçme bölgesine geçtiği ancak 0.75m tepe deplasman değerine ulaşıldığında ise çift bağ kirişinin göçme bölgesi eleman hasar oranları %1.75'de kalırken diğer modellerin göçme bölgesi eleman hasar oranları %2 civarında olmuştur.

- Yapı performans noktası grafikleri incelendiğinde çift bağ kirişi modelinin performans noktasındaki yatay kuvvet kapasitesi 32962 kN olduğu görülmüştür bu değer diğer modellerden %5 daha azdır. Analiz modellerinin performans noktasındaki tepe deplasman değerleri incelendiğinde ise çift bağ kirişi modelinin 0.155m tepe deplasmanı yaptığı ve bu değer diğer modellerin tepe deplasman değerlerinden %5 daha fazladır.
- Modellerin 49000 kN yatay yüklemdeki davranışları incelendiğinde en fazla elastik bölgede kompozit ve diyagonal modeldeki taşıyıcı elemanların kaldığı görülmüştür. 0.5m tepe deplasman altındaki davranışlar incelendiğinde ise çift kiriş modelin elastik bölgede en fazla elemana sahip olduğu görülmüştür.

Tüm bu analiz sonuçları ışığında, deprem etkilerinin kolon ve kirişlerin oluşturduğu çerçeveler ile bağ kirişli perdeler tarafından birlikte karşılandığı büyük yer değiştirmeler ve yüksek yatay yüklemeler incelendiğinde, kompozit ve diyagonal bağ kirişli modelinin daha rijit davranış gösterdiği ve daha yüksek yatay yük kapasitesinin olduğu görülmüştür. Çift bağ kirişi modeli ise diğer bağ kirişi modellerinden daha sünek davranış gösterdiği görülmüştür.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- ACI, 2019, ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills MI.
- Budiono, B., Dewi, N. T. H. ve Lim, E., 2019, Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Coupling Beams, *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 51 (6), 762-771.
- Chairunnisa, N., Satyarno, I., Muslikh ve Aminullah, A., 2017, Analysis and design of shear wall coupling beam using hybrid steel truss encased in reinforced mortar, 3rd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials - Sustainable Structures for Future Generations, 171, 940-947.
- Choi, Y., Hajyalikhani, P. ve Chao, S. H., 2018, Seismic Performance of Innovative Reinforced Concrete Coupling Beam-Double-Beam Coupling Beam, *ACI Structural Journal*, 115 (1), 113-125.
- Eljadei, A. A. ve Harries, K. A., 2014, Design of coupled wall structures as evolving structural systems, *Engineering Structures*, 73, 100-113.
- ETABS, 2020, Integrated Building Design Software, Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA.
- Eurocode8, 2004, Design of Structures For Earthquake Resistance, Nemetschek.
- Foroughi, S., Jamal, R. ve Yüksel, B., 2020, ŞEKİL DEĞİŞTİRME ESASLI HASAR SINIRLARININ BELİRLENMESİNDE SARGI DONATISININ VE EKSENEL YÜKÜN ETKİSİ, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8 (4), 1042-1052.
- Fortney, P., J., 2005, The Next Generation of Coupling Beams, Doctor of Philosophy, University of Cincinnati, USA.
- Gong, B. G. ve Shahrooz, B. M., 2001, Steel-concrete composite coupling beams - behavior and design, *Engineering Structures*, 23 (11), 1480-1490.
- Hou, W., Xu, S. L., Ji, D. S., Li, Q. H. ve Zhang, P., 2019, Seismic performance of steel plate reinforced high toughness concrete coupling beams with different steel plate ratios, *Composites Part B-Engineering*, 159, 199-210.
- ideYAPI, 2020, İdeYapı Ltd Şti, Şişli - İstanbul.
- Li, G. Q., Pang, M. D., Sun, F. F., Jiang, J. ve Hu, D. Z., 2018, Seismic behavior of coupled shear wall structures with various concrete and steel coupling beams, *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27 (1).
- Li, X., Sun, Y. S., Ding, B. D. ve Xia, C. Z., 2020, Cyclic Behavior of Deep RC Coupling Beams with Different Reinforcement Layouts, *Journal of Earthquake Engineering*, 24 (1), 155-174.
- Li, Y. H., Jiang, H. J. ve Yang, T. Y., 2019, Damage Deformation of Flexure-Yielding Steel-Reinforced Concrete Coupling Beams: Experimental and Numerical Investigation, *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-15.
- Lim, E. W., Hwang, S. J., Wang, T. W. ve Chang, Y. H., 2016, An Investigation on the Seismic Behavior of Deep Reinforced Concrete Coupling Beams, *ACI Structural Journal*, 113 (2), 217-226.
- Montgomery, M. S., 2013, Fork Configuration Damper (FCDs) for Enhanced Dynamic Performance of High-rise Buildings, University of Toronto, Doctor of Philosophy.
- Özer, Ö. ve Yüksel, S. B., 2020a, Farklı Betonarme Bağ Kirişi Modellerinin TBDY (2018)'e Göre Yapı Performansına Etkisi, *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, 25, 1169 - 1188.
- Özer, Ö. ve Yüksel, S. B., 2020b, Deprem Etkilerinin Betonarme Çerçeveler İle Boşluklu Betonarme Perdeler Tarafından Birlikte Karşılandığı Yüksek Binaların Analiz Sonuçlarının TBDY, (2018) ve DBYBHY, (2007) 'ye Göre Karşılaştırılması, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9, 931 - 945.
- Özer, Ö. ve Yüksel, S. B., 2021, Deprem Yüklerinin Tamamının Betonarme Perde Duvarlarla Karşılandığı Binalarda Bağ Kirişi Modellerinin Yapı Performansına Etkisi, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8, 346-362.
- Özsoy Özbay, A. ve Kaya, G., 2019, PERDE VE ÇERÇEVELİ BETONARME YAPILARDA PERDE KONUMUNUN PLANDA DÜZENLENMESİ VE YAPISAL DAVRANIŞA ETKİSİ, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7 (1), 7-17.

- Park, W. S. ve Yun, H. D., 2006, The bearing strength of steel coupling beam-reinforced concrete shear wall connections, *Nuclear Engineering and Design*, 236 (1), 77-93.
- Seo, S. Y., Yun, H. D. ve Chun, Y. S., 2017, Hysteretic Behavior of Conventionally Reinforced Concrete Coupling Beams in Reinforced Concrete Coupled Shear Wall, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11 (4), 599-616.
- TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.



Ca²⁺ SALINIMI YARDIMIYLA SİLİS DUMANLI VE UÇUCU KÜLLÜ HARÇLARIN H₂SO₄ DİRENCİNİN İNCELENMESİ

Paki TURGUT^{1*}, Kazım TÜRK², Feridun DEMİR³, Nuray KARADAŞ⁴

¹ İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

² İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

³ Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Osmaniye, Türkiye

⁴ Şanlıurfa Büyükşehir Belediyesi, Arıtma Tesisleri Daire Başkanlığı

Anahtar Kelimeler

Silis Dumanı,
F Sınıfı Uçucu Kül,
Harç,
Ca²⁺ Salınımı,
Asit Direnci.

Öz

Literatürde F sınıfı uçucu külün asit direncini artırdığı konusunda fikir birliği bulunmasına karşın, silis dumanının asit direncini artırıp artırmadığı konusunda bir fikir birliği oluşmamıştır. Bu çalışmada, seyreltilmiş H₂SO₄ çözeltisi kullanılarak silis dumanlı ve F sınıfı uçucu küllü kendiliğinden yerleşen harçların asit dirençleri, Ca²⁺ iyon salınımı dikkate alınarak incelenmiştir. Uçucu küllü numunelerde, Portland çimentosu ile F sınıfı uçucu külün yer değiştirme oranları ağırlıkça %25, %30 ve %35'tir. Silis dumanlı numunelerde, Portland çimentosu ile silis dumanın ağırlıkça yer değiştirmeleri %5, %10 ve %15'tir. Tüm yer değiştirme oranlarında F sınıfı uçucu kül içeren harçların asit dirençleri, silis dumanı içeren harçlardan daha iyi olmuştur. %30 F sınıfı uçucu kül içeren harçın asit direnci, hem silis dumanlı hem de F sınıfı uçucu kül içeren diğer numunelerden daha yüksektir. %5 ve %10 silis dumanı içeren harçların asit direnci ise, %15 silis dumanlı harç ve Kontrol numunelerinden daha büyük olmuştur. F sınıfı uçucu külden elde edilen sonuçlar ile diğer araştırmacıların sonuçları uyum içerisindedir. Ancak silis dumanlı numunelerin sonuçları kısmen literatürle uyum içerisinde olmuştur.

INVESTIGATION OF H₂SO₄ RESISTANCE OF MORTARS WITH SILICA FUME AND FLY ASH BASED ON Ca²⁺ LEACHING

Keywords

Silica Fume,
Class F Fly Ash,
Mortar,
Ca²⁺ Leaching,
Acid Resistance.

Abstract

Although there is a consensus in the literature that class F fly ash increases acid resistance, there is no consensus on whether silica fume increases acid resistance. In this study, acid resistances of self-compacting mortars with silica fume and class F fly ash were investigated using diluted H₂SO₄ solution based on Ca²⁺ leaching. In the samples with class F fly ash, the replacement ratios of Portland cement with class F fly ash were 25%, 30% and 35% by weight. In the samples with silica fume, the replacement ratios of Portland cement with silica fume were 5%, 10% and 15% by weight. Acid resistances of mortars with class F fly ash at all replacement ratios were better than those of silica fume. The acid resistance of the mortar containing class F fly ash at 30% replacement ratio was higher than other mortars with silica fume or class F fly ash. Acid resistances of mortars with silica fume at 5% and 10% replacement ratios were much higher than those of silica fume at 15% replacement ratio and the control sample. The results obtained with class F fly ash in this study were in agreement with the results of other researchers. However, the results of the samples with silica fume were partially in agreement with the literature.

Alıntı / Cite

Turgut, P., Türk, K., Demir, F., Karadaş, N., (2022). Ca²⁺ Salınımı Yardımıyla Silis Dumanlı Ve Uçucu Küllü Harçların H₂SO₄ Direncinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 180-187.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

P. Turgut, 0000-0002-3711-4605
K. Türk, 0000-0002-9488-1587
F. Demir, 0000-0001-6372-6958
N. Karadaş, 0000-0003-3164-0724

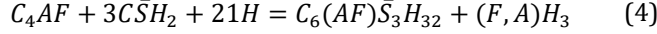
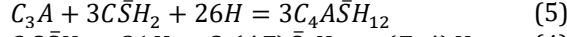
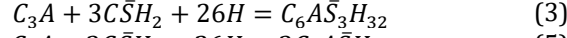
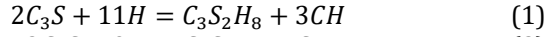
Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	25.04.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	05.09.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	23.09.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

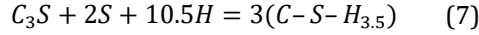
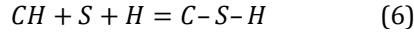
1. Giriş (Introduction)

Hammaddesinin bol miktarda bulunması ve ucuz olması, yerleştirildiği kalıbın şeklini aldıktan sonra sertleşmesi ve yapıların hızlı bir şekilde inşasına olanak sağlaması, teorik olarak dayanımının yüksek ve hizmet ömrünün uzun olması bakımından, beton henüz daha yeri doldurulmamış yapay bir malzemedir. Beton malzemesinin en önemli bileşenlerinden birisi çimentodur ve agregaya yığınlarını bir arada tutmaktadır. Çimentonun bağlayıcılık ve dolayısıyla dayanım kazanması nem, sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonudur. Belirtilen bu üç parametreye bağlı olarak çimentonun hidratasyon (kimyasal reaksiyon) olayı devam etmekte ve sertleşmiş çimento hamurunun yapısını teşkil eden ürünler oluşmaktadır.

Sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki en önemli ürünlerden birisi Kalsiyum Silikat Hidrattır ($C-S-H$) ve sertleşmiş çimento hamuruna dayanım özelliğini kazandırmaktadır. Beton içerisindeki agregaya yığınlarını bir arada tutan ve betonun genel dayanımını sağlayan da yine bu üründür. Portland çimentosu (PÇ) klinkerinin ana bileşenlerinden C_3S ve C_2S 'nin su ile reaksiyonundan $C-S-H$ oluşmaktadır. $C-S-H$ 'in oluşumuyla eşzamanlı olarak, $C-S-H$ üzerinden salınan bir miktar Ca^{2+} iyonları da boşluk suyu içerisindeki OH^- iyonlarıyla birleşerek kalsiyum hidroksit (CH) ürününü oluşturmaktadır. CH ürünü tabakalı kristal bir yapıya sahiptir ve tabakaları birbirine zayıf bağla bağlıdır. CH ürününün $20\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki pH değeri 12.5'tir. C_3A ana bileşeninin alçıtaşı (kalsiyum sülfat) ve su ile reaksiyonundan etrenjit ürünü oluşmaktadır. Ancak sülfat C_3A 'yı tamamen tüketemezse, etrenjit ürünü bir başka kalsiyum sülfat hidrat olan monosülfata dönüşmektedir. C_4AF ana bileşeninin reaksiyonu da C_3A 'ya benzer olmaktadır. Ana bileşenlerin hidratasyon ürünlerinin oluşumu aşağıda verilmiştir (Mindess vd., 2003).



Beton özelliklerini iyileştirmede bazı mineral katkıları PÇ ile birlikte kullanılmaktadır. Puzolanik özelliklere sahip olan silis dumanı (SD) ve uçucu kül (UK), betonda yaygın bir şekilde kullanılan mineral katkılardır. SD ve F sınıfı UK'nin, C_3S ve C_2S ana bileşenlerinin hidratasyonu sonucu meydana gelen CH ve ana bileşenlerden C_3S ile reaksiyonları sonucunda aşağıda verilen $C-S-H$ ürünleri oluşur.



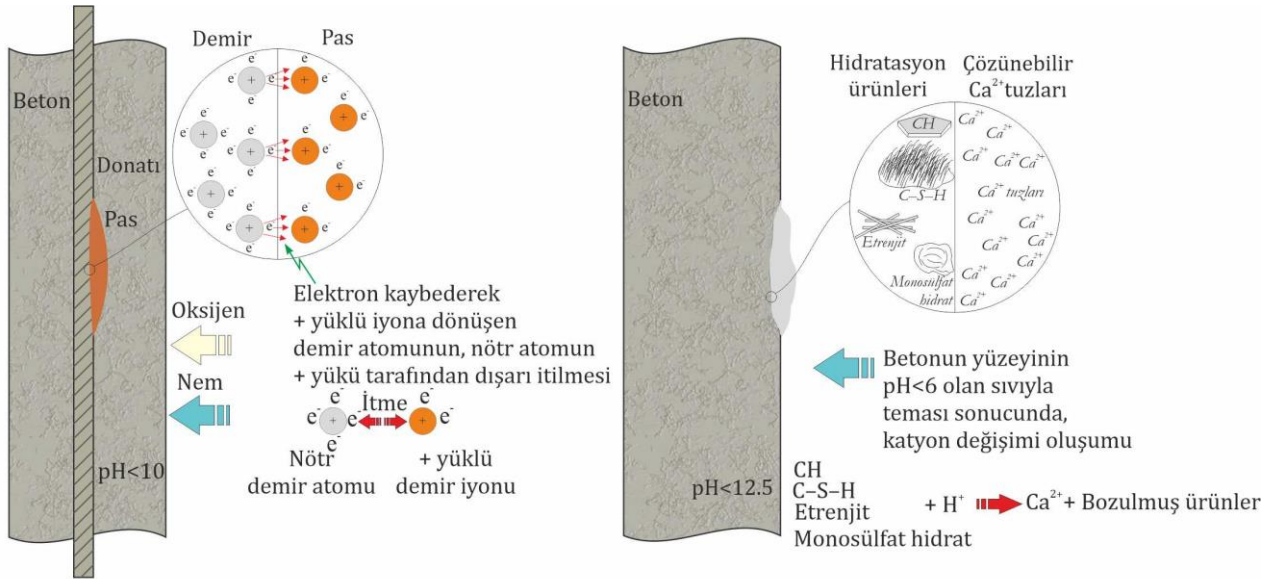
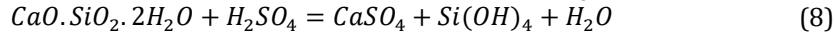
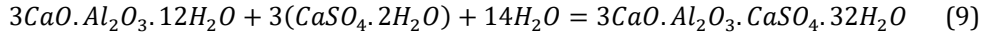
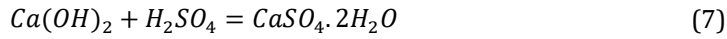
PÇ'nun suyla reaksiyonu ve puzolanik reaksiyon sonucunda oluşan $C-S-H$ ürünleri birbirinin benzeridir. Ancak PÇ'nun hidratasyonu sonucu oluşan $C-S-H$ üründeki C/S oranı, puzolanik reaksiyon sonucunda oluşan $C-S-H$ 'nin C/S oranından biraz daha büyüktür. Puzolanik reaksiyondan oluşan $C-S-H$ ürünündeki C/S oranı 1 olmasına karşın, C_3S ve C_2S ana bileşenlerinin hidratasyonu sonucunda meydana gelen $C-S-H$ 'nin C/S oranı 1.7'dir. C/S oranının azalması, PÇ'nun hidratasyonu sonucunda oluşan $C-S-H$ üzerinde ikincil bir puzolanik reaksiyonun meydana geldiğini gösterir (Mindess vd., 2003). SD ve F sınıfı UK'nin puzolanik reaksiyonu sonucunda oluşan $C-S-H$ ürününden dolayı, boşluk çözeltisinin kompozisyonu değişmektedir. SD ve F sınıfı UK'nin puzolanik reaksiyonundan dolayı, boşluk çözeltisindeki Ca^{2+} iyonları azalmaktadır. Böylece, PÇ hamurunun boşluk miktarı da değişmektedir. Boşluk miktarındaki değişimin nedeni şudur; Kullanılan PÇ miktarı sabit olmasına karşın, SD ve F sınıfı UK kullanıldığından daha fazla $C-S-H$ üretilir. $C-S-H$ 'in hacmi, SD ve CH 'in toplam hacminden daha büyüktür. Çünkü oluşan $C-S-H$ ürünü ayrıca su da içermektedir. Dolayısıyla, sertleşmiş hamurdaki boşluk etkili bir şekilde azalmaktadır.

Hidratasyonunu tamamlamış PÇ hamurundaki $C-S-H$, CH ve kalsiyum alüminat-silikat hidrat ($C-A-S-H$) çözünemeyen hidratasyon ürünleri ile bu ürünlerin içerisindeki ya da etrafındaki boşluk sıvısının pH değerinin yüksek olması durumunda denge oluşmaktadır. Çimento hamurunun boşluklarında bulunan CH (yani OH^-) ve etrafındaki Na^+ , K^+ iyonlarının miktarına bağlı olarak, sertleşmiş çimento hamurunun pH değeri 13 ile 14 arasında değişmektedir. Sertleşmiş çimento hamuru içerisine sızan suların ortamın pH değerini düşürmesiyle, kimyasal denge bozulmakta ve hidratasyon ürünlerini oluşturan bazı atomlar iyonlaşarak salınmaktadır (Taylor, 1997).

Sertleşmiş çimento hamurunun bozulması, pratikte donatının paslanması olayına benzemektedir. Beton içerisindeki donatının paslanması ile yine betonun bileşenlerinden sertleşmiş çimento hamurundaki hidratasyon ürünlerinin bozulması Şekil 1'de gösterilmektedir. Donatının paslanması olayında, değişik nedenlerden dolayı betonun pH azalır, donatının üzerindeki koruyucu oksit tabakası yırtılır ($pH < 10$ olduğunda), oksijen ve nem beton içerisine sızarak anot ve katot bölgeleri oluşur, nötr haldeki demir atomları elektron kaybederek pozitif yüklü demir iyonuna dönüşür ve nihayetinde nötr haldeki demir atomlarının pozitif yüklü çekirdekleri tarafından

itilerek dışarıda pas olarak birikir. Böylece, betonun içerisindeki orijinal donatıyı oluşturan demir atomları koparak uzaklaşır ve donatı bozunmuş olur (Şekil 1a) (Torraca, 2009). Betonun bozunması olayında, pH değeri düşük ($pH < 6$) sıvılar beton içerisine sızar ve sertleşmiş çimentonun Ca atomu içeren hidratasyon ürünlerine ulaşır, H^+ iyonları tarafından katyon değişimleri meydana gelir. H^+ iyonları tarafından hidratasyon ürünlerinden Ca atomlarını kopardıktan sonra, Ca^{2+} iyonları betonun dış yüzeyinde kalsiyum tuzları olarak biriktirilir (Şekil 1b) (Taylor, 1997). Böylece, betonun içerisindeki hidratasyon ürünleri bozunarak işlevini zamanla kaybederek, betonda içerisinde boşluk meydana getirir. Gerek donatının paslanması olayında, gerekse sertleşmiş çimento hamurunun bozulmasından dolayı malzemelerde dayanım kaybı meydana gelir. Her iki olayın önlenmesi veya kısmen yavaşlatılması üretilen betonun geçirimsiz olmasına bağlıdır.

H_2SO_4 ile hidratasyon ürünleri arasındaki reaksiyondan oluşan ilk ürün alçıtaşıdır ve betonun içerisinden dışarı doğru sızarak yüzeyde birikmektedir. Beton yüzeyinde biriken alçıtaşı geçirimsiz bir tabaka oluşturarak, H_2SO_4 'ün dışarıdan içeri doğru sızmasını zorlaştırmakta ve daha ileri düzeyde bozulmasını engellemektedir. Ancak yumuşak ve zayıf bir yapıya sahip olduğundan yıkanarak kolayca yüzeyden uzaklaşabilmektedir. Hidratasyon ürünlerinin alçıtaşı ve H_2SO_4 ile reaksiyonu sonucu oluşan ürünler aşağıda verilmiştir (Monteny vd., 2000). Oluşan hidratasyon ürünleri betonda hacim artışı yaparak çatlamalara neden olur. Etrejlit ürününden kaynaklanan hacim artışı, alçıtaşının yapacağı hacim genişlemesinden çok daha fazladır. H_2SO_4 ile C-S-H'nin reaksiyonu sonucunda, C-S-H bozunarak sulu amorf silikata dönüşmektedir.



a) Donatının paslanması
(Corrosion of rebar)

b) Çimento hamurunun bozunması
(Deterioration of cement paste)

Şekil 1. Donatı ve çimento hamurunun bozunması (Deterioration of rebar and cement paste)

Yumuşak su içerisindeki karbondioksit, deniz sularındaki sülfat ve klor iyonları, yeraltı suları ve endüstriyel atık sularda bulunan hidrojen iyonları, suyun pH değerini 6'dan daha az bir değere düşürebilmektedir. Bu durum sertleşmiş çimento hamuru için oldukça zararlıdır. Bu tür suların sertleşmiş çimento hamuru ile temas etmesi durumunda, bazı hidratasyon ürünleri içerisindeki Ca^{2+} iyonları çözülmeye başlar. Sertleşmiş çimento hamuru içerisinde bu tür suların basınçlı bir şekilde akışı durumunda, sertleşmiş çimento hamurunun bozulması çok daha hızlı olmaktadır. Sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki Ca^{2+} iyonunun salınımı, çoğunlukla hidratasyon ürünlerinden birisi olan CH'de meydana gelmektedir. Sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki Ca^{2+} iyonlarının salınımı dayanım azalmasına neden olmaktadır. Örneğin, sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki Ca^{2+} iyonlarının üçte birinin ayrılması, basınç dayanımı değerinin yarıya düşmesine neden olmaktadır (Hewlett, 2003).

Bu çalışmada, içerisinde SD ve F sınıfı UK kullanılmış harçların (daha doğrusu çimento hamurunun) Ca^{2+} iyonlarının salınımına etkisi incelenmiştir. Literatürde F sınıfı uçucu külün asit direncini artırdığı konusunda fikir birliği bulunmasına karşın, silis dumanının asit direncini artırıp artırmadığı konusunda bir fikir birliği oluşmamıştır. PÇ hamuru içerisindeki ağırlıkça %15 SD'nın, %1 H_2SO_4 çözeltisine karşı direnci bir miktar artırdığı Mehta (1985) tarafından bulunmuştur. Monteny vd. (2003) ağırlıkça %8.6 SD içeren beton üretmişler ve bu betonun %0.5 H_2SO_4 çözeltisine direncini incelemişlerdir. SD'nın sertleşmiş PÇ hamuru içerisinde çok küçük

boşluklar oluşturarak, asidin etkiyeceği temas yüzeyini artırdığını ve böylece aside direncin azaldığını ileri sürmüşlerdir. Kawai vd. (2008) tarafından yapılan bir çalışmada ise, ağırlıkça %20 SD'lı ile %30 UK'lü çimento hamuru ve harç numuneler üretilmiş, pH değerleri 1 ve 2 olan H₂SO₄ çözeltileri içerisinde bekletilmişlerdir. Deneyden önceki ve sonraki CH miktarları ölçülmüştür. SD içeren numunelerin aside karşı direncinin, hem kontrol hem de F sınıfı UK'lü numunelerden çok daha iyi olduğunu bulmuşlardır. Aynı zamanda, %30 UK'lü numunenin asit direncinin kontrol numunesine kıyasla çok daha iyi olduğu belirtilmiştir. Uchikawa (1986) ise, mineral katkı içeren sertleşmiş çimento hamurunun iyon geçirgenliğini boşluk boyutu dağılımının mükemmel olması nedeniyle azalttığını ileri sürmüştür. Bunun nedenini çimento hamuru içerisindeki CH'in azalmasına bağlamıştır. Çünkü CH'in çimento hamuru içerisinde salınımı, sertleşmiş hamurun iyon geçirgenliğini artıracaktı. Rozière ve Loukili (2011) PÇ ile ağırlıkça %30 yer değiştirmiş F sınıfı uçucu külden üretilmiş sertleşmiş çimento hamurunun pH değeri 5 olan asit içerisinde Ca²⁺ iyonu salınımının azaldığını bulmuşlardır. Durning ve Hicks (1991) ise, ağırlıkça %7.5, %15 ve %30 SD'lı betonlar üretmiş ve bunları %1 H₂SO₄ çözeltisine maruz bırakmışlardır. Kullanılan tüm SD oranlarında aside karşı direncin kontrol betonuna kıyasla azaldığını görmüşlerdir. Ancak düşük pH değerine sahip bir ortamda C-S-H yapısının dengesinin SD sayesinde iyileştiğini de ileri sürmüşlerdir. Monteny vd. (2003) ağırlıkça %8.6 SD içeren beton numunenin %0.5 H₂SO₄ çözeltisi içerisinde direncinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Chang vd. (2005) da, %7 SD ve %33 UK içeren betonların %1 H₂SO₄ çözeltisi içerisindeki dayanıklılığının arttığını ileri sürmüşlerdir.

Bu çalışmada, SD ve UK'lü PÇ harçlarının, pH değeri 3.5 olan H₂SO₄ çözeltisi içerisindeki Ca²⁺ iyon salınımları incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Numune Hazırlama (Sample Preparation)

Bu çalışmada, hazırlanan numunelerin üretimi ve özellikleri Türk (2012) tarafından detaylı bir şekilde verilmiştir. Harç numune karışımlarında, CEM I 42,5N tipi PÇ, F sınıfı UK ve SD kullanılmıştır. Malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri (Chemical and physical properties of materials)

Bileşenler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	LOI	Yoğunluk	Özgül yüzey (cm ² /g)
PÇ	20.2	5.8	3.23	64.1	-	2.66	0.006	2.58	3.10	3484
UK	58.82	19.65	10.67	2.18	3.92	0.48	-	0.91	2.08	3812
SD	91	0.58	0.24	0.71	0.33	-	-	1.84	2.20	96.5%<45µm

Harç numunelerin karışımında kullanılan malzemelerin miktarları da Tablo 2'de verilmiştir. Bu çalışmada, beton sektöründe en çok kullanılan SD ve UK oranları seçilmiştir. Kontrol karışımı sadece PÇ içermiştir. Diğer karışımlarda ise, PÇ+UK ve PÇ+SD bağlayıcılar kullanılmıştır. Mineral katkı içeren karışımlarda, PÇ miktarı azaltılmış ve azaltılan bu PÇ miktarı yerine mineral katkı kullanılmıştır. Kontrol karışımında 640 kg/m³ PÇ kullanılmıştır. F sınıfı UK'nın PÇ ile yer değiştirmeleri ağırlıkça %25, 30 ve 35 ve SD'nin %5, 10 ve 15'tir (Türk, 2012). Kendiliğinden yerleşen harç numunelerinin hazırlanması işleminde ASTM C109 (2013) standardı takip edilmiş ve taze karışım testleri ise, EFNARC (2005)'a göre yapılmıştır. EFNARC (2005)'ta istenilen taze karışım özellikleri, karışımların su/bağlayıcı oranı (W/B) ya da süper akışkanlaştırıcı (SA) miktarları değiştirilerek deneme-yanılma yöntemiyle sağlanmıştır. Karışımlarda dere kumu kullanılmış olup, en büyük tane çapı 2 mm'dir. EFNARC (2005)'ın belirttiği özellikleri sağlayan taze harç karışımlarıyla 50×50×25 mm'lik numuneler üretilmiştir. Numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmış ve 90 gün boyunca su içerisinde kür edilmiştir. Bu süre sonunda, numuneler 60 °C sıcaklıktaki etüv içerisinde değişmez ağırlığa gelinceye kadar, 48 saat süreyle kurutulmuş ve iyon salınımı deneyine hazır duruma getirilmiştir.

Tablo 2. Numunelerde kullanılan malzemelerin miktarları (The amount of materials used in samples)

Karışımlar	W/B (%)	PC (%)	UK (%)	SD (%)	Binder (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)	SA (kg/m ³)
Kontrol	0.45	100	0	0	640	1227	6.75
UK25	0.43	75	25	0	640	1194	6.75
UK30	0.43	70	30	0	640	1181	6.75
UK35	0.43	65	35	0	640	1168	6.75
SD5	0.44	95	0	5	640	1230	8
SD10	0.45	90	0	10	640	1203	8
SD15	0.47	85	0	15	640	1159	8

2.2. Ca²⁺ İyon Salınımı Deneyi (Ca²⁺ Leaching Test)

Beton ya da çimento hamurunda iyon salınımının ölçülmesiyle ilgili olan herhangi bir standart bulunmadığından, bu çalışmada basit bir kimyasal yöntemle iyon salınımı deneyi yapılmıştır. Deneyde kavanoz, saf su, H₂SO₄, karıştırıcılar ve sıcaklık kontrollü bir oda kullanılmıştır. Deneyde kullanılan sıvıların sıcaklığı 23 °C'dir. Kavanozlar içerisinde pH değeri 3.5 olan çözeltiler hazırlamak için, tüm kavanozlar belirli bir seviyeye kadar eşit miktarda saf suyla dolduruldu. Çözeltinin pH değerinin 3.5'e ayarlanması işleminde H₂SO₄ kullanıldı.

Hazırlanmış olan numuneler içerisinde çözelti bulunan kavanozlara yerleştirildi ve 24 saat bekletildi. 24 saatin sonunda, kavanozların içerisindeki sıvı karıştırıldıktan sonra 5 ml çözelti alındı ve tüpler içerisine doldurularak buzdolabında saklandı. Eksilen çözelti miktarı kadar saf su tekrar kavanozlar içerisine eklendi ve çözeltilerin pH değerleri tekrar H₂SO₄ kullanılarak 3.5 değerine ayarlandı. Bu işlemler 6 gün boyunca devam etti. Tüm numuneler için toplamda 42 adet çözelti elde edildi. Toplanan numuneler Perkin Elmer Optima 5300DV ICP-OES marka bir cihaz kullanılarak Ca²⁺ iyonlarının miktarı mg/L olarak bulundu.

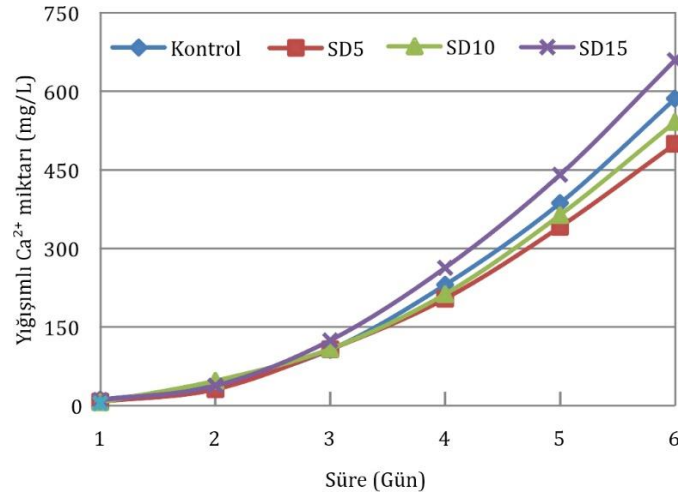
3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Numunelerin süreye bağlı yığılımlı Ca²⁺ iyon salınımları Şekil 2 ve 3'te gösterilmektedir. Bu çalışmada, beton teknolojisinde en çok kullanılan SD ve UK oranları dikkate alınarak numuneler üretilmiştir. Numunelerin hepsinde de Ca²⁺ iyonu salınım miktarları süreye bağlı olarak üstel bir şekilde artmıştır. 6 günlük toplam Ca²⁺ iyonu salınım miktarları da Şekil 4'te gösterilmiştir. %25, %30 ve %35 oranlarında UK içeren numunelerin Ca²⁺ iyon salınım miktarları, kontrol numunesine kıyasla etkili bir şekilde azalmıştır. Ancak %30 UK içeren UK30 numunesindeki iyon salınımı miktarı, UK25 ve UK35 numunelerinden daha az olmuştur.

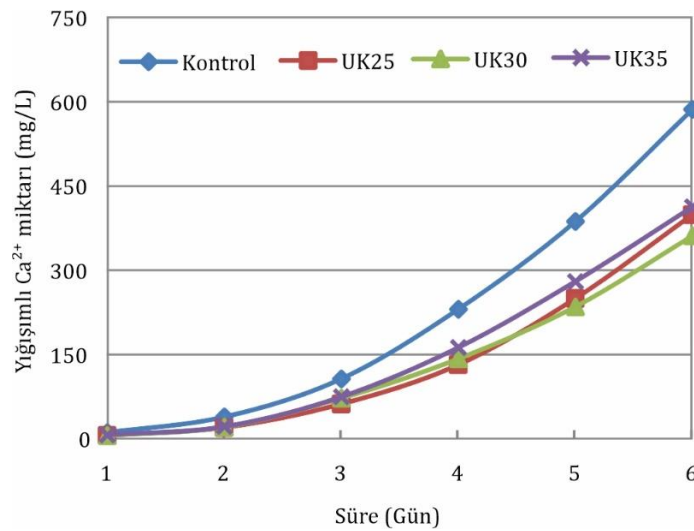
SD'lı numunelerde, sırasıyla %5 ve %10 SD içeren SD5 ve SD10 numunelerindeki Ca²⁺ iyon salınım miktarları, kontrol numunesinden daha az olmuştur. Ancak %25 SD içeren SD25 numunesindeki Ca²⁺ iyon salınım miktarı, kontrol numunesine kıyasla daha fazla olmuştur. Kontrol, SD5, SD10 ve SD15 numunelerinden, % 5 SD içeren SD5 numunesindeki Ca²⁺ iyon salınımı değeri en az olmuştur. Çimento hamuru içerisinde kullanılan SD'nın Ca²⁺ iyon salınımına, dolayısıyla, H₂SO₄ asidi çözeltisine gösterdiği direnç kullanılan SD miktarına göre değişmektedir. SD'lı ile UK'lü numuneler karşılaştırıldığında, UK'lü numunelerin Ca²⁺ iyonu salınım miktarlarının, SD'lı numunelerdeki salınımlardan daha az olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, UK içeren numunelerin SD'lı numunelere kıyasla genel olarak Ca²⁺ iyonu salınımını etkili bir şekilde azalttığı söylenebilir.

Bu çalışma sonuçları ile literatürdeki çalışmaların sonuçları arasında SD'nın etkisiyle ilgili olarak bazı çelişkiler olmasına rağmen, genel itibariyle özellikle UK'ün etkisiyle ilgili durum uyuşmuştur. Bu çalışma ve literatürdeki mevcut çalışmaların sonuçları Tablo 3'te düzenli bir şekilde verilmiştir. Çalışmalarda kullanılan SD ve UK'ün ağırlıkça % miktarları Tablo 3'ün 2. ve 3. sütununda verilmiştir ve 4. sütunda da asit direnci İyi/Kötü olarak belirtilmiştir. Aside karşı direncin iyi ya da kötü olması durumu, her bir çalışmanın kendi kontrol numunesiyle karşılaştırmalar yapılarak belirlenmiştir.

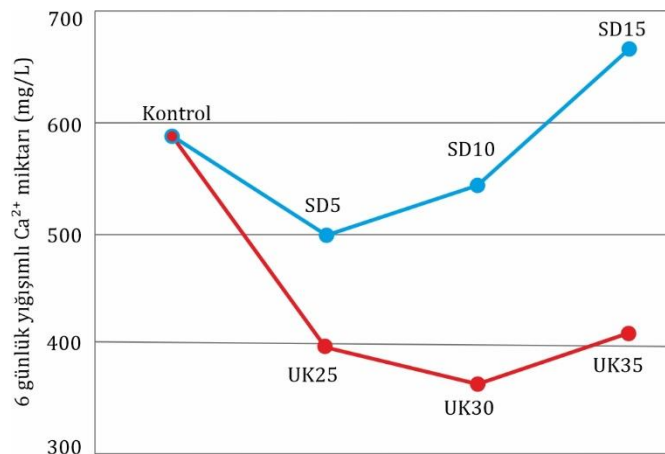
Tablo 3'te görüldüğü gibi, ağırlıkça %15 SD oranında asit direncinin iyi olduğu Mehta (1985) tarafından belirtilmiştir. Ancak Durning ve Hicks (1991) ağırlıkça %15 SD oranının aside karşı direnci kötüleştirdiği bulunmuştur. Ağırlıkça %20 SD oranında asit direncinin iyi olduğunu Kawai vd. (2008) tarafından ileri sürülmüştür. Durning ve Hicks (1991) ise, ağırlıkça %30 SD oranında aside karşı direncin kötü olduğunu bildirmiştir.



Şekil 2. Kontrol ve SD numunelerinde iyon salınımı (Ion leaching of Control and SD samples)



Şekil 3. Kontrol ve UK numunelerinde iyon salınımı (Ion leaching of Control and UK samples)



Şekil 4. 6 günlük yığışimli iyon salınımı miktarları (Cumulative ion leaching for 6 days)

Monteny vd. (2003) ağırlıkça %8.6 SD oranında, Durning ve Hicks (1991) ağırlıkça %7.5 SD oranında asit direncinin kötü olduğu ileri sürmesine karşın, bu çalışmada ağırlıkça %5 ve %10 SD oranlarında asit direncinin iyi olduğu bulunmuştur. Chang vd. (2005) ağırlıkça %7 SD ve %33 UK içeren ikili karışımın asit direncini iyi yönde artırdığını ileri sürmüşlerdir. Görüldüğü gibi, SD'lı numunelerin asit direnciyle ilgili var olan sonuçlar birbirleriyle çelişkilidir. Konuyla ilgili olan geçmişteki çalışmalarda genellikle beton ya da harç numuneler kullanılmıştır. SD'lı numunelerin aside karşı direncinin belirlenmesinde, çimento türü, su/çimento oranı ve boşluk miktarı gibi parametreler de dikkate alınarak değişik kombinezonlarda PÇ-SD hamurlarının üretilmesi, üretilen bu numunelerin mikro-düzeyde incelenmesinin daha gerçekçi sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

Kawai vd. (2008) ile Roziere ve Loukili (2011), ağırlıkça %30 UK oranında asit direncinin iyi olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada da ağırlıkça %30 UK oranının asit direncini etkili bir şekilde iyileştirdiği bulunmuştur. Chang vd. (2005) %33 UK içeren karışımın asit direncini iyi yönde artırdığını ileri sürmüşlerdir. Görüldüğü gibi, literatürde F sınıfı UK'le ilgili var olan çalışmaların sonuçlarıyla, bu çalışmada elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyusmaktadır.

Tablo 3. Kontrol numunelerine kıyasla SD ve UK'lü numunelerin asit direnci.

No	% SD	% UK	Asit Direnci	Kaynaklar
1	15	-	İyi	(Mehta, 1985)
2	20	-	İyi	(Kawai vd., 2008)
3	8.6	-	Kötü	(Monteny vd., 2003)
4	7.5;15;30	-	Kötü	(Durning ve Hicks, 1991)
5	7	33	İyi	(Chang vd., 2005)
6	5;10	-	İyi	Bu çalışmada
7	15	-	Kötü	Bu çalışmada
8	-	30	İyi	(Roziere ve Loukili, 2011)
9	-	30	İyi	(Kawai vd., 2008)
10	-	25;30;35	İyi	Bu çalışmada

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, UK ve SD içeren harç numunelerin aside karşı göstermiş olduğu dirençlerle ilgili olarak aşağıdaki önemli bulgular elde edilmiştir.

F sınıfı UK içeren numunelerin aside karşı göstermiş olduğu direnç, SD'lı numunelerin asit dirençlerinden çok daha iyi olmuştur. Numuneler içerisinde ağırlıkça %25, %30 ve % 35 F sınıfı UK kullanımı, asit direncinin bir göstergesi olan Ca^{2+} iyon salınımını önemli ölçüde azaltmıştır. Ağırlıkça %30 UK durumunda, Ca^{2+} iyon salınımı en az olmuştur. UK'ün asit direnciyle ilgili olarak bu çalışmada bulunan sonuçlar ile literatürdeki çalışmaların sonuçları uyum içerisinde.

Ağırlıkça %5 ve %10 SD içeren numunelerin Ca^{2+} iyon salınımı, kontrol numunesinden daha az olmuştur. Ancak ağırlıkça %15 SD kullanımı aside karşı direnci oldukça kötüleştirmiştir. SD'lı numune grubu içerisinde, ağırlıkça %5 SD içeren numunede Ca^{2+} iyonu salınımı en az olmuştur. Literatürdeki çalışmalarla kıyaslandığında, SD'nın asit direncine etkisi halen tartışmalıdır. Asit direnciyle ilgili geçmişte yapılan çalışmalarda, ya SD'lı beton ya da harç numuneler kullanılmıştır. Bunların yerine, SD'lı çimento hamurlarının kullanılması ve durumun mikro-düzeyde incelenmesi daha gerçekçi sonuçlar verecektir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırmaları Destekleme Birimi (HÜBAK) tarafından, 16197 numaralı proje ile desteklenmiştir. Katkılarından dolayı HÜBAK'na 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)

- American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. ASTM International, 2013.
- Chang, Z.T., Song, X.J., Munn, R., Marosszky, M., 2005. Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulfuric acid attack, *Cem Concr Res* 35(8), 1486-1494.
- Durning, T.A., Hicks, C., 1991. Using microsilica to increase concrete's resistance to aggressive chemicals, *Concr Inter* 13(3), 42-48.
- EFNARC (2005). The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use.
- Hewlett, P., Lea's chemistry of cement and concrete. Elsevier, 2003.
- Kawai, S., Williams, M. Y., Nishoni, W., 2008. Deterioration of cement hydrates containing mineral admixtures due to sulphuric acid attack, in: 11DBMC Int. Conf. Durab. Mater. Components, pp. 1203-1205.
- Mehta, P.K., 1985. Studies on chemical resistance of low water/cement ratio concretes, *Cem Concr Res.* 15, 969-978.

- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. Concrete. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.
- Monteny, J., Belie De, N., Taerwe, L., 2003. Resistance of different types of concrete mixtures to sulfuric acid, *Mater Struct* 36(4), 242–249.
- Monteny, J., Vincke, E., Beeldens A., De Belie N., Taerwe L., Van Gemert D., 2000. Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulphuric acid corrosion of concrete, *Cem Concr Res.* 30 (4), 623–634.
- Rozière, E., Loukili, A., 2011. Performance-based assessment of concrete resistance to leaching, *Cem Concr Compos* 33, 451–456.
- Taylor, H.F.W., *Cement Chemistry*. Thomas Telford, London, 1997.
- Torraca, G., *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*. The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2009.
- Turk, K., 2012. Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume. *Constr Build Mater*, 37, 326–334.
- Uchikawa, H., 1986. Effect of blending components on hydration and structure formation. *8th Int. Congr Chem Cem* 1, 250–280.



DEĞİŞTİRİLMİŞ AYRIK HAAR DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İLE YENİ BİR HİSTOGRAM EŞİTLEME YÖNTEMİ

Faruk BULUT*

İstanbul Arel Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Düşük Dinamik Aralığı,
Haar Dalgacık Dönüşümü,
Histogram Eşitleme,
Kontrastı İyileştirme.*

Öz

Histogram eşitleme dijital görüntülerin kontrastını artırmak için kullanılan yöntemlerden biridir. İdeal histogram eşitleme yöntemlerinde, girdi ve çıktı arasındaki görüntü benzerliğini koruyarak histogramdaki dağılımları tekdüze hale getirerek kontrast gerilmektedir. Frekans alanında yapılan bu çalışmada, Düşük Dinamik Aralığında değiştirilmiş ayırık Haar Dalgacık Dönüşümü ile yeni bir görüntü kontrast germe yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde Olasılık Kütle Fonksiyonunu ile frekansların yüksek geçiş kanalında gürültülü frekanslara bir baskılama işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yapılan frekans dönüşümlerinde histogram frekansların dinamik aralıklarında önemli bir azalma sağlanmıştır. Frekans alanındaki bu işlem görüntüde standart sapmanın artmasını sağlayarak görüntü kalitesinin iyileşmesini sağlar. Kıyaslamalı bir veri seti üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda, önerilen yöntem konvansiyonel metotlarla kıyaslanmış ve umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Görüntü kalitesi değerlendirme metriklerinden Tepe Sinyal Gürültü Oranı (PSNR), Ortalama Kare Hata (MSE), Yapısal Benzerlik Endeks Ölçütü (SSIM) ve Kontrast değeri deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Önerilen bu yaklaşım ile elde edilen sonuçlar diğer algoritmaların sonuçları ile kıyaslandığında hem kalitatif hem de kantitatif açıdan başarılı bulunmuştur.

A NEW HISTOGRAM EQUALIZATION METHOD WITH MODIFIED DISCRETE HAAR WAVELET TRANSFORM

Keywords

*Low Dynamic Range,
Haar Wavelet Transform,
Histogram Equalization,
Contrast Enhancement.*

Abstract

Histogram equalization is one of the methods used to increase the contrast of digital images. In the ideal histogram equalization methods, the contrast are stretched by preserving the image similarity between input and output images, making the distributions in the histogram uniform. In this study conducted in the frequency domain, a new image contrast stretching method with Haar Wavelet Transform (HWT) in Low Dynamic Range is proposed. In this method, using the Probability Mass Function (PMF), a suppression process is applied to the noisy frequencies in the high pass channel of the frequencies. Subsequent frequency transformations provide a feasible reduction in the dynamic range of histogram frequencies. This process in the frequency domain improves the image quality by increasing the standard deviation in the image. In experimental studies over a benchmarking dataset, the proposed method is compared with conventional methods and promising results are obtained. In the experimental studies, Peak Signal to Noise Ratio (PSNR), Mean Square Error (MSE), Structural Similarity Index Measurement (SSIM) and Contrast value, which are among the image quality evaluation metrics, are used. In this proposed approach, image quality is evaluated both qualitatively and quantitatively assessments, and successful results are obtained.

Alıntı / Cite

Bulut, F., (2022). Değiştirilmiş Ayırık Haar Dalgacık Dönüşümü ile Yeni Bir Histogram Eşitleme Yöntemi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 188-200.

* İlgili yazar / Corresponding author: farukbulut@arel.edu.tr, +90 212 867 25 00 (1527)

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
F. Bulut, 0000-0003-2960-8725	Başvuru Tarihi / Submission Date	03.05.2021
	Kabul Tarihi / Accepted Date	29.11.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Görüntü iyileştirme yöntemleri, görüntünün öznel kalitesinin insan yorumu için çok önemli olduğu birçok görüntü işleme uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Tung vd., 2021). Genel bir kural olduğu için, görüntü kalitesinin öznel değerlendirilmesindeki karşılık yani kontrast önemli bir konudur. Bir yüzeyden yansıyan renk farkı, kontrastı oluşturur. Yani kontrast, bir nesneyi diğer nesnelere ve arka planlardan ayırmada fark yaratan görsel bir niteliktir (Lecca vd., 2021). İnsanın görsel sistemi, parlaklıktan daha çok kontrasta duyarlıdır. Böylece aydınlatma koşullarındaki önemli değişikliklere rağmen bir insan dünyayı kontrast ile daha kolay algılayabilir. Örneğin, görüntü kontrastı belirli bir bölgede yüksek oranda yoğunlaşmışsa, görüntü çok bulanık hale gelir. Düzgün bir şekilde yoğunlaşan alanlarda görüntü bilgisi doğal olarak kaybolabilir (Tung vd., 2021). Ana amaç, giriş görüntüsünün tüm bilgilerini temsil etmek için görüntü kontrastını optimize etmektir. Genel olarak histogram eşitleme, bu yazının konusu olan kontrast iyileştirme veya görsel kalite iyileştirme için kullanılır.

Literatürde, görüntü kalitesini artırmak için kontrast germe ve histogram eşitleme alanında birçok algoritma önerilmiştir. Literatürdeki, histogram eşitleme metotları iki kategoride incelenebilir. Bunlar GHE (Global Histogram Equalization) ve LHE (Local Histogram Equalization) yöntemleridir. GHE yönteminde, tüm girdi görüntüsünün histogram bilgisi, dönüştürme işleminde kullanılır yani görüntü üzerinde evrensel bir işlem yapılır. Bu yaklaşımın temel amacı, giriş görüntüsünün kümülatif yoğunlukları için bir işlev gerçekleştirerek düzgün dağıtılmış bir histogram elde etmektir. Bu yaklaşım her ne kadar görüntüde genel iyileştirmeler için uygunsa da yerel parlaklık özelliklerini koruyamaz. Diğer taraftan LHE algoritmaları, görüntüdeki komşu piksellerinin histogram yoğunluklarını kullanarak bu sorunları ortadan kaldırır. LHE yöntemleri, görüntünün tüm piksellerini sırayla kaydıran küçük bir kare pencere (maske) kullanır, HE için yalnızca bu pencereye giren piksel blokları dikkate alınır ve daha sonra geliştirme için gri seviye eşlemesi bu pencerenin merkez pikseline uygulanır (Gonzalez vd., 2017). Ancak, LHE'nin gerçekleştirilmesi büyük zaman karmaşıklığı oluşturur ve yüksek hesaplama maliyeti gerektirir. Ek olarak, LHE bazen görüntünün bazı kısımlarında aşırı iyileştirme yapar. Bu ise olumsuz bir durumdur.

Başka bir açıdan da histogram eşitleme yöntemleri hem uzamsal alanda (spatial domain) hem de frekans alanında (frequency domain) yapılabilmektedir. Uzamsal diğer bir deyişle uzaysal alanda yapılan işlemler doğrudan görüntünün renk değerleri üzerinde yapılır. GHE ve LHE gibi algoritmalar genelde bu uzamsal alanda işlem yapmaktadır.

Literatürde birçok histogram eşitleme yöntemi vardır. Önerilmiş olan bu tekniklerin bazıları bu çalışmada avantajları, sınırları ve uygulamaları ile tartışılmıştır. Uzaysal aladaki çalışmalardan farkı olarak Ayrık Haar Dalgacık Dönüşümü (HWT) (Shaik vd., 2018) ile frekans alanında bir kontrast geliştirme yaklaşımı sunulmuştur. Huang ve ark., görüntüdeki ortalama parlaklık değerini koruyan ve otomatik bir histogram ayırma yönteminden oluşan yeni bir histogram eşitleme yaklaşımı önermiştir (Shih-Chia vd., 2013). Ayrıca bu yöntemde, genel görüntü bastırılırken görüntü kalitesi artırılmıştır. Cho ve ark. dalgacık alanında yaptıkları görüntü iyileştirme yönteminde renk tutarlılığını koruyarak hem yerel hem de global parlaklığı ve kontrastı artırmıştır (Dongwook vd., 2014). Iqbal ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada, tıbbi görüntü çözünürlüklerini iyileştirmek için "ikili ağaç"lı karmaşık dalgacık dönüşümü kullanılmıştır. Ayrıca, çift ağaçlı karmaşık dalgacık dönüşümü kullanılarak yüksek frekanslı alt bantlar elde edilmiştir (Iqbal vd., 2014). DWT ve CLAHE'yi birleştiren DWT (CLAHE-ayrık dalgacık dönüşümü) adlı yeni bir görüntü iyileştirme tekniği Lidong ve arkadaşları tarafından tanıtılmıştır (Lidong vd., 2015). Daniel vd., geliştirilmiş Guguk Kuşu Arama Algoritmasını (ECSA) kullanarak medikal görüntülerin kontrast iyileştirmesi için Optimum Dalgacık Tabanlı Maskeleye (OWBM) çalışması yapmıştır (Ebenezer vd., 2016). Dalgacık alanında entropi tabanlı bir kontrast geliştirme yaklaşımı da Kim ve ark. (Kim vd., 2016) tarafından yapılmıştır. FC-CLAHE (Fuzzy Clipped Kontrast-Limited Adaptive Histogram Equalization) olarak adlandırılan dijital mamogramların yerel kontrast arttırmaları için yeni bir histogram tabanlı algoritma Jenifer ve ark. tarafından önerilmiştir (Sheeba vd., 2016). Histogram Eşitleme alanında yapılan çeşitli yöntemlerinin genel ve kapsamlı bir araştırması, Nithyananda ve ark. tarafından gerçekleştirilmiştir. Farklı tipte histogram eşitleme yöntemleri bu çalışmada kronolojik sırayla kısaca açıklanmıştır (Nithyananda vd., 2016). Dalgacık tabanlı gradyan histogramları kullanan uyarlanabilir bir histogram eşitleme yöntemi Kaur ve ark. (Kaur vd., 2017) tarafından inşa edilmiştir. Liu ve ark. ise, SPOHE adında (Tabakalı Parametrik Odaklı Histogram Eşitleme) bir kontrast geliştirme yöntemi bulmuşlardır. Bir önceki yöntemlerde ortaya çıkan görsel hatalar veya engelleyici görüntü bozuklukları olmadan bölgesel iyileştirmeleri etkili bir şekilde sağlamışlardır (Liu vd., 2016). Görüntü öğelerinin (nesnelere ve arka plan) sınırlarında kontrast dağılımını otomatik modda geliştirme yöntemi Yelmanova ve ark. tarafından tanıtılmıştır

(Yelmanova vd., 2017). Mevcut CLAHE-DWT'den türetilen CLAHE-HWT adlı yeni bir hibrid görüntü iyileştirme yöntemi Bharadi ve ark. tarafından önerilmiştir. Burada Hibrit Dalgacık Dönüşümü Tip I (HWT I) kullanılmıştır (Bharadi vd., 2017). İkili Alt Görüntü Histogram Eşitleme (DSIHE) (Wang vd., 1999), Ortalama korunan Bi-Histogram Eşitleme (BBHE) (Kim vd., 1997) ve Minimum Ortalama Parlaklık Hatası Bi-Histogram Eşitleme (MMBEBHE) (Chenand vd., 2003) de görüntü kontrastını geliştirmiştir. Bu yaklaşımlar genel olarak üretilen çıktılarda girdi görüntüsüne ait olan parlaklığını korumasına karşın, doğal görünümüne görüntüler üretmede başarısız olabilirler. Bu alanda yapılmış olan bir başka çalışmada Haar dalgacık dönüşümü kullanılarak ileri düzey bir histogram eşitleme yöntemi önerilmiştir (Bulut, 2021). Öncelikle RGB kanalındaki bilgiler frekansa düzleminde ele alınmış ve ortalama renk bilgisi ile kıyaslanarak daha ileri düzey bir baskılama işlemi yapılmıştır. Elde edilen başarılı sonuçlar literatürde önerilmiş olan çok farklı çalışmalarla ileri düzey ölçütler kullanılarak kıyaslanmıştır.

Görüntü iyileştirilmesi alanında optimizasyon (eniyeleme) yöntemlerinden de sıklıkla faydalanılmaktadır. Örneğin bir çalışmada (Malik vd., 2021) görüntü kontrastının iyileştirilmesi amacıyla, optimal çözümü bulmak için yapay arı kolonisi (ABC) algoritması kullanılmıştır. Ek olarak, Evrişimli Sinir Ağları (Fujioka vd., 2021), Gri Kurt (Das vd., 2020), sürü zekası tabanlı optimize ediciler (Luque-Chang vd., 2021), Parçacık Sürüsü Optimizasyonunu (Aurangzeb vd., 2021) ve MRI (manyetik rezonans görüntüleri) için Dinamik Stokastik Rezonans (DSR) gibi optimizasyon tekniklerini kullanan bazı gelişmiş görüntü kontrastı iyileştirme yöntemleri vardır. Son zamanlarda 2D ve 3D ultrason görüntüleri, manyetik rezonans görüntüleri, X-ışınları, bilgisayarlı tomografi taramaları, nükleer tıp görüntüleme ve pozitron emisyon tomografisi (PET) gibi tıbbi görüntüler için özel olarak tasarlanmış bazı değerli görüntü iyileştirme çalışmaları da bulunmaktadır (Jose vd., 2021), (Janan vd., 2021), (Spille vd., 2021), (Brown vd., 2020).

Geleneksel histogram eşitleme, görüntülerde yapaylıklara ve anormal modellere neden olan gürültü öğelerinin de eşitlendiği bir mekanizma sunar. Bilindiği gibi yapaylıklar ve anormal desenler, görüntü kalitesini ve doğal görünümü düşürür. İdeal yöntemde, orijinal görüntü kalitesi korunurken histogram eşitlemesi de gerçekleştirilmelidir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, bu çalışma Değiştirilmiş Ayrık HWT'ye dayalı yeni bir yöntem önermektedir. Literatüre yeni bir katkı olarak önerilen yöntemde, histogram eşitleme işlemi, gürültülerin genellikle yüksek dinamik aralıkta (High Dynamic Range) olmasından dolayı tüm dönüşüm işlemleri düşük dinamik aralıkta (Low Dynamic Range) gerçekleştirilir. Bu yaklaşım görüntü kalitesi ve parlaklığın korunarak kontrastın iyileştirilmesini sağlamaktadır.

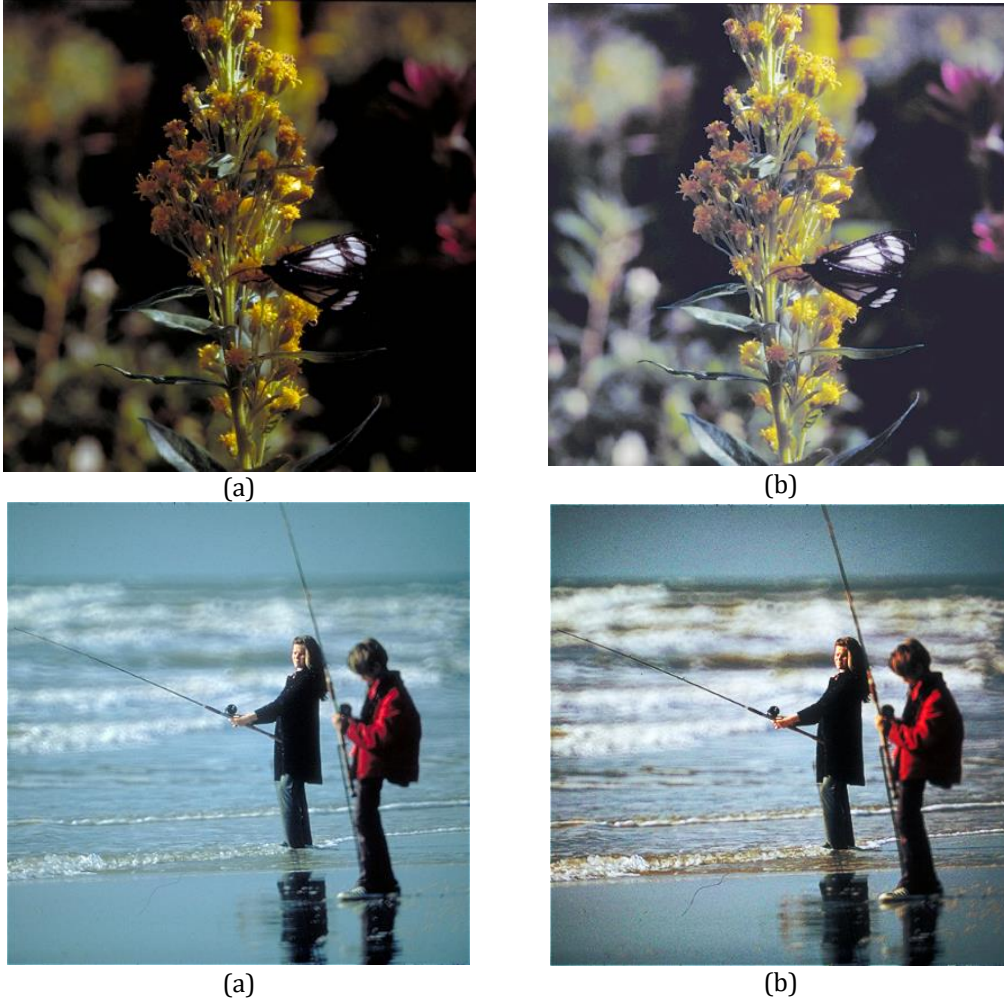
Bu makalede beş bölüm var. Birinci bölümde, yukarıda belirtildiği gibi, önerilen bu yöntemle ilgili çalışmalara ilişkin bir literatür taraması ile bu çalışmaya bir giriş yapılmaktadır. Aşağıdaki ikinci bölümde, önerilen tekniğin açıklamaları ve detayları bulunmaktadır. Üçüncü bölümde deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Teşekkürler kısmı dördüncü bölümde sunulmuştur. Son bölümde özet, gelecekteki çalışmalar ve katkılar bulunmaktadır.

2. Yöntemler (Methods)

Bu bölümde dijital görüntüde histogram eşitleme, ayrık dalgacık dönüşümü ve düşük dinamik aralıkta histogram eşitleme ile ilgili temel bilgiler verilmektedir.

2.1. Histogram Eşitleme (Histogram Equalization)

Dijital görüntüler için, R, G ve B kanallarındaki renk histogramı, o görüntünün her bir kanaldaki renk değerinin görülme sıklığını yani frekansını gösterir. Histogram eşitleme işlemi ile renk dağılımlarının geniş bir skalaya yayılması sağlanır. Bu yöntem parlak, karanlık, arka planı ve ön planı ayırmayan görüntüler için çok kullanışlıdır. Gri tonlamalı bir görüntü için yapılan işlem aynı şekilde kırmızı, yeşil ve mavi renk değerlerinin bileşenlerine ayrı ayrı uygulanarak renkli görüntülerde de yapılabilir. Şekil 1'deki iki farklı test resmi, histogram eşitleme işlemine tabi tutulmuştur. İlk satırdaki resim yüksek kontrasta, diğer resim ise daha düşük kontrasta sahiptir. Her satırdaki ikinci resimde görüldüğü üzere birçok detay daha da belirgin ve fark edilebilir hale getirilmiştir. Örneğin (b) resminde bitki arkasında bulunan diğer bitkiler ile ilgili detaylar açığa çıkmıştır. (d) resminde ise denizin dalgaları bariz bir şekilde fark edilir durumdadır.



Şekil 1. (a): Orijinal resim, (b): Geleneksel Histogram Eşitleme ile iyileştirilmiş resim ((a): Original image, (b): Image enhanced by Conventional Histogram Equalization)

Bu yöntemin önemli bir avantajı, oldukça basit bir teknik olması ve geri dönüşümlü bir operasyona sahip olmasıdır. Teorik olarak, bilinen bir histogram eşitleme işlevi varsa, orijinal histogramı geri yüklemek mümkündür. Çünkü frekans alanında yapılan işlemler sonucunda renk değerleri kaybolmamaktadır. Burada önemli bir nokta, frekans bandından kullanılabilir sinyali baskımlarken arka plan gürültüsünün kontrastını da artırma olasılığının varlığıdır. Bu bilindiği üzere olumsuz bir durumdur. Çalışmamızda bu olumsuz durum izale edilmeye çalışılmıştır.

2.2. Ayırık Haar Dalgacık Dönüşümü (Discrete Haar Wavelet Transformation)

DWT ilk olarak Macar matematikçi Alfréd Haar tarafından icat edilmiştir. Dalgacıklar, verileri frekansa göre sıralamak için geliştirilmiş matematiksel işlevlerdir ve tek boyutlu bir dizide yani vektörde saklanırlar. Dalgacık dönüşümü, öncelikle verileri uzaysal alandan (spatial domain) frekans alanına (frequency domain) dönüştürür ve her renk bileşenini görünürlük ölçeğinde depolar. Daha sonra HWT, herhangi bir sinyali (x_i) yüksek geçişli ve düşük geçişli alt bantlar olmak üzere iki banda ayırır. Düşük geçiş bandı (s_k), dalgacıkların yani vektördeki sayıların ortalama değerini; yüksek geçiş bandı (d_k) ise dalgacıkların farklılıklarını tutar. Burada bir dalgacık, bir vektör uzayının ortogonal temelini temsil eder. Burada bileşenler bir vektörde toplanmalıdır. N bileşen yani renk sayısı olmak kaydıyla (genelde $N=255$), $\log_2 N$ hamlede alçak ve yüksek frekanslar tek tek sırasıyla şu şekilde ortalama alınarak hesaplanır:

$$s_k = \frac{(x_{2k} + x_{2k+1})}{2}, \quad d_k = \frac{(x_{2k} - x_{2k+1})}{2}, \quad \text{for } k = 0, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (1)$$

Frekans alanından çıkış işlemi için ise şu aşamalar uygulanır:

$$s_k + d_k = \frac{(x_{2k} + x_{2k+1})}{2} + \frac{(x_{2k} - x_{2k+1})}{2} = x_{2k} \quad (2)$$

$$s_k - d_k = \frac{(x_{2k} + x_{2k+1})}{2} - \frac{(x_{2k} - x_{2k+1})}{2} = x_{2k+1} \quad (3)$$

Son olarak geri dönüşüm işleminde şu şekilde bir adresleme (eşleştirilme) işlemi yapılır:

$$= (x_1, x_2, \dots, x_N) \rightarrow (s \mid d) = (s_1, \dots, s_{N/2} \mid d_1, \dots, d_{N/2}) \quad (4)$$

2.3. Düşük Dinamik Aralıkta Histogram Eşitleme: DDA-HE (Histogram Equalization in Low Dynamic Range)

Burada, iki boyutlu bir resmin tek boyutlu normalleştirilmiş histogramı (Olasılık Kütle Fonksiyonu) ile HWT'ye entegrasyonu sunulmaktadır. Sunulan yöntemin amacı, aynı zamanda histogramı eşitlerken görüntü kalitesini arttırmaktır, çünkü geleneksel histogram eşitleme yöntemlerinde aynı zamanda gürültüyü de eşitleme gibi bir dezavantajı da vardır. HWT, herhangi bir sinyali iki banda ayırır: yüksek geçişli ve düşük geçişli alt bantlar. Düşük geçiş bandı, girişlerin ortalama değerini korurken, yüksek geçiş bandı girişler arasındaki farkları korur. Farklılıklar, HWT'nin çoklu çözünürlük çerçevesinde sinyalin nasıl değiştiğini gösterir. Gürültünün genellikle yüksek dinamik aralıkta var olduğu bilinmektedir. Giriş vektörünün dinamik aralığını daha düşük standart sapma ile azaltılmaktadır ve dolayısıyla histogram eşitleme yapıldıktan sonra parazitler en aza indirilmiş olur. Bu durum görüntü kalitesi iyileştirmektedir. Yöntemimizde, Olasılık Kütle Fonksiyonu (PMF) üzerine Değiştirilmiş Ayrık HWT uygulanmaktadır ve Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonunu (CDF) aşağıdaki gibi oluşmaktadır.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x}{\alpha}, & |x| > \mu \\ x, & |x| \leq \mu \end{cases} \quad (5)$$

$$cdf_x(i) = \sum_{j=0}^i \psi_{f(x)}(p_x(i)) \quad (6)$$

x , burada bir boyutlu HWT dizisindeki renk frekanslarından türetilmiş yüksek geçiş bandındaki katsayılarıdır. μ ise HWT dizisindeki tüm frekans değerlerinin ortalamasıdır. Mutlak değer içerisindeki x ise sinyalin büyüklüğünü vermektedir. Eğer herhangi bir bir HWT katsayısı, ortalama değerden büyükse muhtemelen gürültü barındırıyor ve baskılanması gerekmektedir. $f(x)$ fonksiyonundaki α hiper parametresi ile ortalamadan büyük sinyaller belirli oranlarda küçülmektedir. $\alpha = 1$ olması demek geleneksel HWT dönüşümünün yapıldığı anlamına gelmektedir. Bu çalışmada α parametresi önemli bir rol oynamaktadır. Alfa değeri ne kadar fazla olursa, sinyal gücünde o kadar fazla azalma meydana gelir. Sonsuza giden alfa değeri ile elde edilen görüntü, orijinal görüntü ile birebir aynı görüntüdür. Burada önemli bir konu şudur, baskılama işlemi HWT dizisindeki ilk eleman hariç diğerlerine yapılmaktadır. Çünkü ilk eleman HWT dizisinin ortalama değerini muhafaza etmektedir. Bilindiği üzere histogramın normalleştirilmiş versiyonu PMF'dir. Bu yöntemle, PMF'nin ortalama değeri korunurken PMF sinyalleri güçlendirmektedir. Güçlendirilmiş PMF'yi elde ettikten sonra, CDF oluşturulur ve son olarak histogram eşitlemesi tamamlanır. $\psi_{f(x)}$ işlemi Haar dalgacık dönüşüm fonksiyonudur ve $p_x(i)$ ise i .inci dalgacığın görülme sıklığını vermektedir.

Bu yöntemde, gürültü öğelerinin genellikle yüksek dinamik aralıkta görüldüğü için düşük dinamik aralıkta histogram eşitlemesi yapılmaktadır. Bu makalenin amacı, HWT'nin dinamik aralık azaltma ve kontrast geliştirme sağlayan histogramlarda nasıl uygulanabileceğini kanıtlamaktır.

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Öncelikle, tüm deneyler normal özelliklere sahip bir bilgisayar kullanılarak CSIQ test veri setindeki (Larson vd., 2010) 30 resim üzerinde gerçekleştirilmiştir. Başarım testleri MATLAB ortamında yapılmıştır.

3.1. Performans Ölçüm Metrikleri (Performance Measurement Metrics)

Önerilen histogram eşitleme yönteminden sonra görüntü kalitesinin nasıl korunduğunu ölçmek için dört adet görüntü kalitesi ölçütü kullanılmıştır. Bunlar Ortalama Kare Hata (MSE), Tepe Sinyal-Gürültü Oranı (PSNR), Yapısal Benzerlik İndeksi (SSIM) ve her resmin son olarak kontrast değeridir (İnce vd., 2022). MSE ve PSNR, görüntü işleme algoritmalarının performansını değerlendirmek için görüntü işlemede kullanılan ölçütlerdir. Girdi ve çıktı fotoğrafı olarak X ve Y , $N \times M$ boyutunda iki matris olsun. İki sinyal arasındaki MSE aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$MSE = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} [X(i, j) - Y(i, j)]^2 \quad (7)$$

Y, X'e ne kadar yakınsa, MSE o kadar küçük olacaktır. Açıkça ki, MSE sifıra eşit olduğunda maksimum benzerlik elde edilir. L toplam renk çeşidi olmak kaydıyla PSNR ise şu şekilde tanımlanır:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{L^2}{MSE} \quad (8)$$

Kalite ölçüm metriği olarak, desibel birim üreten PSNR, orijinal ve filtrelenmiş görüntüler arasındaki farkı hesaplar. PSNR değeri ne kadar yüksekse, filtrelenmiş görüntünün kalitesi o kadar iyi olur. PSNR ve MSE, görüntü filtreleme kalitesini karşılaştırmak için kullanılan iki hata ölçüm kriteridir. MSE, filtrelenmiş ve orijinal görüntüler arasındaki kümülatif kare hatasını gösterir (İnce vd., 2019). PSNR ise tepe hatanın ölçüsünü görüntüler. Kısaca, MSE değeri ne kadar düşükse, hata o kadar düşük olur.

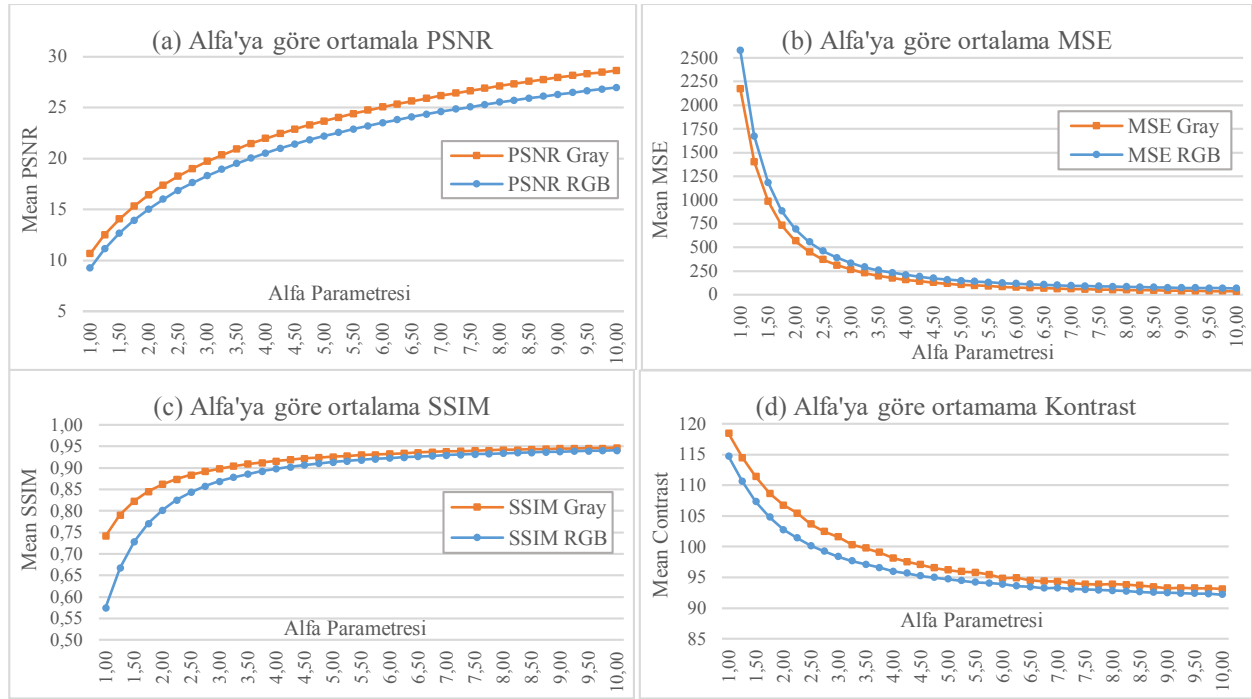
SSIM indeksi, iki görüntü arasındaki yüzdellik benzerliği belirlemek için yaygın ve iyi bilinen bir kriterdir. SSIM, [0, 1] aralığında reel bir değer verir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x + \mu_y + C_1)(\sigma_x + \sigma_y + C_2)} \quad (9)$$

Kontrast değerleri ise, görüntüdeki renk değerlerinin standart sapması ile bulunur. Yüksek kontrast değeri yüksek görüntü kalitesi demektir. Diğer bir açıklamayla bir görüntünün kontrastı, basitçe maksimum ve minimum piksel yoğunluğu arasındaki fark olarak açıklanabilir. Yani, aynı görüş alanı içindeki bir grup nesnenin parlaklık veya renk farkıdır. Bu çalışmada, kalite değerlendirmesi için kenar tabanlı kontrast ölçümü (EBCM) bir performans kriteri olarak tercih edilmiştir (Jang vd., 2016). Bu ölçü, geliştirilmiş bir görüntünün normalde orijinal görüntüden daha fazla kenar pikseline sahip olduğu gerçeğine dayanmaktadır.

3.2. Deneysel Çıktılar ve Analizi (Experimental Outputs and Analysis)

Önerilen yöntem bir alfa parametresi gerektirdiğinden, görüntü kalitesi metriklerinin farklı alfa parametre değerlerine bağlı olarak nasıl değiştiğini gözlemlemek için, alfa, 1.0'dan 10.0'a 0.25 adımlarla başlayan bir dizi sıralı değerlerle test edilmiştir. Sonuçlar Şekil 2'de gösterildiği gibi gözlemlenebilir. Şekil 2'de gösterilen sonuçlara göre, PSNR ve SSIM, alfa ile pozitif bir logaritmik korelasyona sahipken, MSE ve Kontrast, alfa ile negatif bir logaritmik korelasyona sahiptir. Bu, alfa artırılırken görüntü kalitesinin arttığı ve dinamik aralıktaki parazit miktarının azaldığı anlamına gelir. Alfa doygun noktasını bulmak için alfa 10 değerine kadar azar azar çıkarılır ve sonrasında somut bir değişiklik olmadığı gözlemlenir. Bunlara ek olarak, histogram eşitleme, parazit öğelerinin genellikle bulunmadığı düşük dinamik bir aralıktaki kontrastı artırarak görüntü kalitesini yükseltir. Bu yöntemle histogram daha az görüntü ile eşitlenir ve mevcut diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar elde edilir.



Şekil 2. Hem Gri Tonlama hem de RGB renk uzayları için alfa parametrelerine göre PSNR oranları (a), MSE değerleri (b), SSIM oranları (c) ve Kontrast Değerleri (d).

3.3. Diğer Yöntemlerle Performans Karşılaştırması (Performance Comparison with Other Methods)

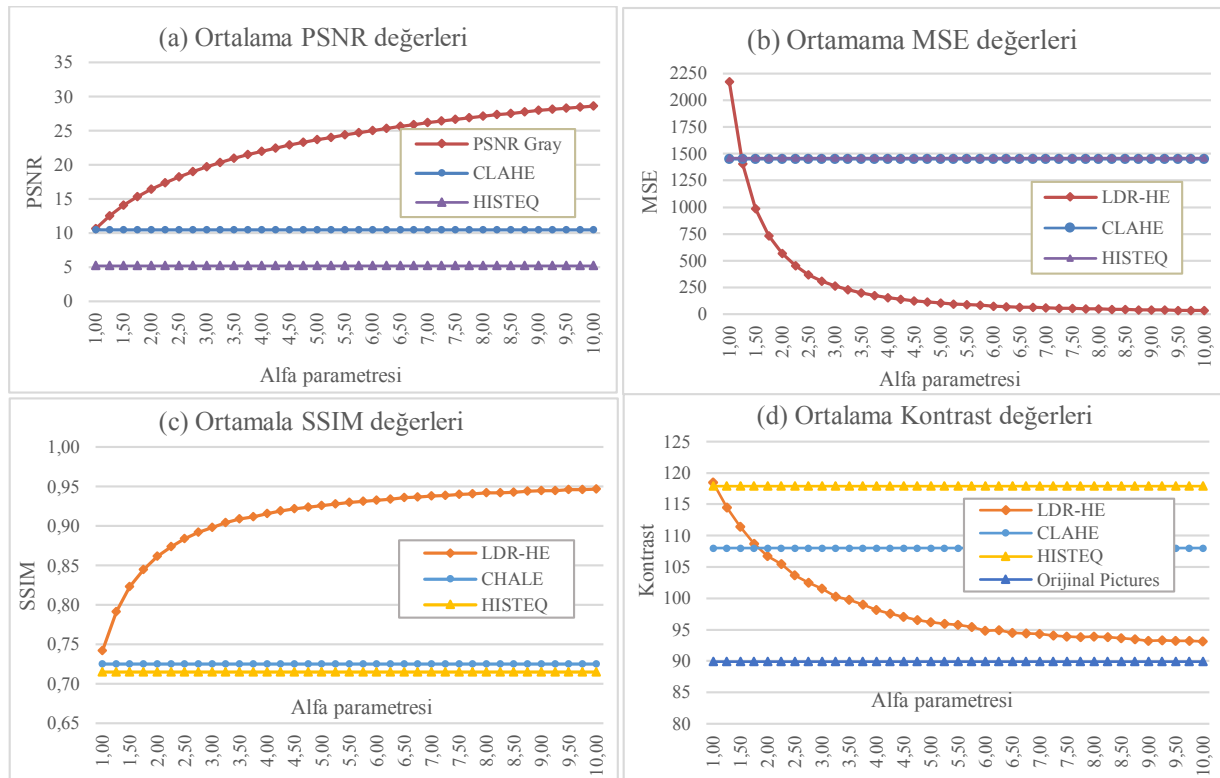
Bu bölümde, önerilen yöntem literatürde var olan mevcut konvansiyonel yöntemle karşılaştırarak kıyaslamalı bir çalışma yapılmıştır. Çok yaygın olarak kullanılan Histogram Eşitleme yöntemi (HISTEQ) ve Kontrast Sınırlı Uyarlanabilir Histogram Eşitleme (CLAHE) (Sahu vd., 2019) metodu çalışmaya dâhil edilmiştir.

Tablo 2. Orijinal resimlerin kontrast ölçümleri, mevcut yöntemlerle eşitlenmiş görüntüler ve Gri tonlamalı ve RGB formatlarında DDA-HE $\alpha = 1,75$ (Contrast measurements of original images, images synchronized with existing methods, and DDA-HE in Grayscale and RGB formats, $\alpha = 1,75$)

	Gri için kontrast				RGB için kontrast			
	Orijinal	CLAHE	HISTEQ	DDA-HE	Orijinal	CLAHE	HISTEQ	DDA-HE
Resim 1	74.3	146.3	137.0	118.4	81.1	136.9	130.6	110.8
Resim 2	67.7	101.4	117.1	106.9	77.4	106.0	118.5	109.3
Resim 3	119.1	125.6	114.1	111.4	123.4	125.2	113.9	116.3
Resim 4	117.6	134.7	124.6	123.7	118.1	134.8	124.4	122.9
Resim 5	12.7	64.7	116.1	75.9	13.1	55.7	115.9	74.7
Resim 6	47.5	92.9	112.5	107.3	80.6	114.9	115.2	107.2
Resim 7	115.1	121.8	124.8	123.3	101.8	120.7	123.1	119.3
Resim 8	135.3	117.7	118.5	125.8	129.4	118.4	117.5	123.0
Resim 9	69.2	109.7	117.7	101.5	64.6	106.2	116.5	98.1
Resim 10	61.7	68.1	124.3	91.1	59.4	66.5	123.1	107.2
Resim 11	201.2	132.6	115.3	130.9	176.2	134.4	117.1	133.2
Resim 12	96.1	111.7	105.4	102.4	89.2	110.1	107.4	101.2
Resim 13	128.8	116.2	110.0	111.1	135.6	115.3	109.8	113.7
Resim 14	215.2	166.7	122.9	136.8	211.8	176.7	121.8	145.0
Resim 15	50.8	102.0	110.8	97.1	56.2	105.9	112.9	95.7
Resim 16	107.8	125.3	117.9	114.1	117.7	123.9	118.0	117.3
Resim 17	111.0	117.1	119.4	120.4	109.6	114.6	119.7	116.8
Resim 18	132.2	125.8	124.1	129.3	122.2	121.9	124.3	125.3
Resim 19	66.6	99.7	121.5	101.7	68.4	100.9	122.2	102.7
Resim 20	38.9	69.7	114.5	75.8	35.3	62.9	111.2	74.2
Resim 21	126.9	94.0	107.7	120.0	145.4	103.0	108.3	123.0
Resim 22	44.9	101.5	116.6	90.4	52.6	97.9	116.0	90.0
Resim 23	63.3	76.3	114.2	89.9	64.1	76.2	114.2	89.7

Resim 24	150.1	121.8	125.1	131.2	148.0	128.6	124.8	131.8
Resim 25	93.8	118.5	120.8	116.3	79.8	106.5	119.7	110.3
Resim 26	26.4	81.5	122.2	104.3	27.3	76.4	118.8	97.2
Resim 27	78.6	114.9	113.9	108.6	90.9	114.9	112.3	109.3
Resim 28	55.5	97.6	117.7	108.5	60.9	89.1	118.6	102.6
Resim 29	55.6	74.0	111.6	88.1	51.1	71.9	108.2	82.5
Resim 30	33.8	110.9	118.4	97.8	36.0	111.5	117.5	96.1
ORT.	89.9	108.0	117.9	108.7	90.9	107.6	117.4	104.78
STD. SAP.	48.54	23.84	6.34	15.98	45.63	25.57	5.55	16.74

Tablo 2'de görüldüğü üzere gri seviyede elde edilen sonuçlar ile RGB'de elde edilen sonuçlar arasında yüksek bir korelasyon vardır. Bu durum önerilen yöntemin renk kanallarından bağımsız olduğunu göstermektedir. Ayrıca, optimum bir alfa değeri bulmak için, önerilen yöntemin ve mevcut yöntemlerin aynı değerlere sahip olduğu kontrast değerleri gözlemlenmiştir. Gözlemler sonucunda CLAHE'nin kontrast değerlerinin hemen hemen aynı olduğu deneylerde kontrast doygunluk noktası olarak alfa değeri 1.75 olarak belirlenmiştir. Bu değer önerilen yöntem için en ideal değerdir.



Şekil 3. Alfa parametre değerlerine göre yöntemler arasında Ortalama PSNR'ler (a), Ortalama MSE'ler (b), Ortalama SSIM'ler (c) ve Ortalama Kontrastların (d) karşılaştırılması (Comparison of Mean PSNRs (a), Mean MSEs (b), Mean SSIMs (c), and Mean Contrasts (d) between methods according to alpha parameter)

Önerilen DDA-HE (LDR-HE) yönteminin başarıları Şekil 3'teki eğriler incelenerek analiz edilebilir. Bu şekillerde CLAHE ve HISTEQ sonuçları sabittir, alfa parametresine bağlı değildir. Yöntemler arasındaki performans farkını göstermek için şekilde gösterildiği gibi bir örnekleme stili tanıtılmıştır. DDA-HE, kendi hiper parametresine çok duyarlıdır. DDA-HE, aşağıdakilere bağlı olarak düşük dinamik aralıkta histogram eşitlemesi gerçekleştirdiğinden α parametresinde, değer artırıldığında resimlerin kontrast değeri logaritmik olarak azalmaktadır. Bununla birlikte, PSNR ve SSIM değerleri, alfa alanında MSE azalırken logaritmik olarak alfa miktarı kadar artar. Bu, orijinal resimle görüntü kalitesinin ve yapısal benzerliğin alfa miktarı kadar arttığını kanıtlamaktadır. Bununla birlikte, histogram eşitlemesinin amacı kontrastı artırmak olduğu için kontrastta aşırı miktarda azalma tercih edilmez. Bu sorunu çözmek için DDA-HE ve CLAHE noktalarının kesişme noktaları alfa alanındaki kontrast değerlerine göre belirlenir. Tablo 3 ve Tablo 4, sırasıyla tüm ve özet deney sonuçlarının karşılaştırmalarını aşağıdaki gibi göstermektedir:

Tablo 3. DDA-HE'nin mevcut yöntemlerle karşılaştırılması (Comparison of DDA-HE with existing methods)

	CLAHE (GRİ)				HISTEQ (GRİ)				DDA-HE (GRİ) ($\alpha = 1,75$)			
	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast
Resim 1	7.53	2454.5	0.70	146.28	8.98	1908.5	0.76	136.99	14.42	502.48	0.91	118.39
Resim 2	8.14	1775.3	0.68	101.40	8.60	1720.0	0.69	117.14	13.08	570.38	0.94	106.91
Resim 3	11.91	1154.8	0.70	125.62	12.00	1166.6	0.71	114.12	16.47	404.46	0.87	111.40
Resim 4	12.26	1383.9	0.73	134.66	12.54	1313.9	0.75	124.56	23.19	111.75	0.96	123.71
Resim 5	2.70	2146.1	0.58	64.74	2.93	1912.6	0.60	116.14	1.29	2966.3	0.50	75.87
Resim 6	11.02	1032.6	0.82	92.90	12.01	940.6	0.87	112.47	12.67	706.41	0.78	107.33
Resim 7	11.42	1248.2	0.71	121.85	10.34	1509.3	0.67	124.85	16.33	402.77	0.90	123.31
Resim 8	11.14	1971.4	0.78	117.72	11.41	1811.2	0.66	118.54	24.24	96.55	0.98	125.83
Resim 9	7.49	2276.0	0.74	109.70	7.34	2314.5	0.65	117.70	14.41	462.10	0.95	101.54
Resim 10	12.70	398.3	0.65	68.05	14.23	339.51	0.75	124.35	6.47	1673.10	0.64	91.11
Resim 11	12.97	1148.9	0.69	132.57	12.66	1303.5	0.70	115.28	15.70	611.63	0.83	130.86
Resim 12	11.03	1403.1	0.81	111.68	10.15	1606.5	0.73	105.43	22.69	95.67	0.99	102.37
Resim 13	11.04	1921.3	0.72	116.25	11.12	1920.5	0.71	109.95	17.64	420.26	0.90	111.06
Resim 14	16.85	511.5	0.82	166.68	17.20	529.33	0.89	122.92	14.89	803.26	0.86	136.80
Resim 15	6.64	1968.1	0.74	101.98	6.96	1941.3	0.74	110.80	9.02	1137.2	0.83	97.08
Resim 16	13.30	995.1	0.82	125.25	12.98	1100.7	0.79	117.89	31.42	15.34	0.98	114.12
Resim 17	11.52	1385.7	0.76	117.11	11.58	1367.7	0.73	119.40	23.89	80.14	0.92	120.41
Resim 18	10.54	2029.9	0.71	125.82	10.39	2003.9	0.67	124.07	28.85	29.95	0.98	129.29
Resim 19	6.84	2208.9	0.66	99.69	7.29	2060.9	0.66	121.51	11.15	818.63	0.85	101.66
Resim 20	6.64	1558.0	0.59	69.68	6.56	1505.7	0.58	114.49	5.14	2205.1	0.55	75.75
Resim 21	12.30	1460.9	0.78	93.97	12.16	1623.9	0.77	107.74	23.62	107.78	0.96	119.99
Resim 22	5.57	2766.3	0.69	101.49	6.28	2435.1	0.65	116.59	10.01	994.26	0.86	90.36
Resim 23	13.89	452.81	0.75	76.28	13.77	475.15	0.73	114.23	8.70	1497.5	0.60	89.85
Resim 24	14.99	625.78	0.74	121.76	15.43	581.51	0.70	125.13	19.77	207.99	0.82	131.24
Resim 25	13.44	709.01	0.77	118.50	11.38	1151.3	0.77	120.82	16.59	342.71	0.94	116.30
Resim 26	11.18	863.98	0.77	81.48	10.27	979.41	0.74	122.15	10.40	1033.4	0.77	104.27
Resim 27	12.05	972.85	0.78	114.86	12.33	956.8	0.79	113.94	16.70	333.93	0.91	108.55
Resim 28	11.39	1010.2	0.74	97.58	10.26	1203.8	0.71	117.74	14.44	499.90	0.88	108.49
Resim 29	10.54	791.62	0.65	74.01	9.32	970.7	0.63	111.59	7.05	1768.7	0.61	88.14
Resim 30	5.21	2895.8	0.65	110.87	5.23	2992.8	0.62	118.37	9.51	1074.7	0.87	97.80
ORT.	10.47	1450.7	0.72	108.01	10.46	1454.9	0.72	117.90	15.33	732.49	0.85	108.66
STD.SAP.	3.19	690.07	0.06	23.84	3.11	617.7	0.07	6.34	7.10	702.10	0.14	15.98







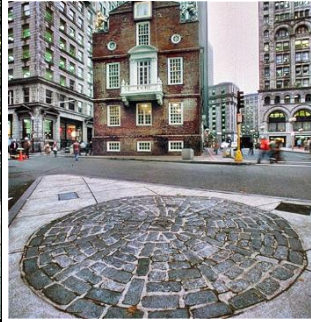



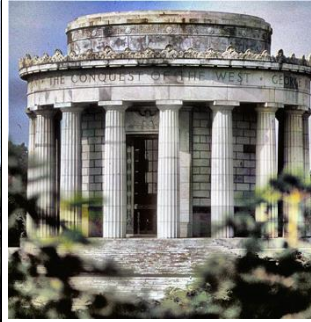
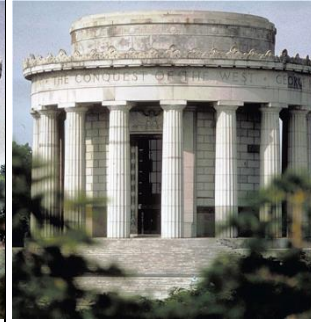
Tablo 4'de önerilen yöntem ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek PSNR değeri, en düşük MSE değeri ve en yüksek SSIM değeri elde edilmiştir. Bu durum, nicelik açısından başarılı sonuçlar elde edildiğini göstermektedir.

Tablo 4. Mevcut yöntemlerle DDA-HE sonuçlarının özeti (Summary of DDA-HE results with available methods)

	CLAHE (GRİ)				HISTEQ (GRİ)				DDA-HE (GRİ) ($\alpha = 1,75$)			
	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast
ORT.	10.47	1450	0.72	108.01	10.46	1454	0.72	117.90	15.33	732.49	0.85	108.66
STD.SAP.	3.19	690	0.06	23.84	3.11	617	0.07	6.34	7.10	702.10	0.14	15.98

Tablo 5'de histogram eşitleme sonuçlarından alınmış bazı görüntüler orijinal resim referans alınarak kalitatif ve kantitatif değerlendirme için verilmiştir. CLAHE ve HISTEQ yöntemlerinde her ne kadar görsel açıdan iyi bir iyileştirme elde edildiği gözlemlense de yüksek bir kontrast kazancının olduğu açıktır. Bu durum görüntüde bazı bozulmalara neden olmaktadır.

Tablo 5. Tüm yöntemlerden örnek deneysel sonuçlar (Sample experimental results from all methods)

Orijinal	HISTEQ	CLAHE	DDA-HE ($\alpha = 1, 75$)
			
PSNR: - MSE: - SSIM: - Kontrast: 128.8	PSNR: 11.12 MSE: 1920.53 SSIM: 0.71 Kontrast: 1109.95	PSNR: 11.04 MSE: 1921.31 SSIM: 0.72 Kontrast: 116.25	PSNR: 17.64 MSE: 420.26 SSIM: 0.90 Kontrast: 111.06
			
PSNR: - MSE: - SSIM: - Kontrast: 119.10	PSNR: 12.00 MSE: 1166.67 SSIM: 0.71 Kontrast: 114.12	PSNR: 11.91 MSE: 1154.88 SSIM: 0.70 Kontrast: 125.62	PSNR: 16.47 MSE: 404.46 SSIM: 0.87 Kontrast: 111.40
			
PSNR: - MSE: - SSIM: - Kontrast: 111.00	PSNR: 11.58 MSE: 1367.71 SSIM: 0.73 Kontrast: 119.40	PSNR: 11.52 MSE: 1385.71 SSIM: 0.76 Kontrast: 117.11	PSNR: 23.89 MSE: 80.14 SSIM: 0.92 Kontrast: 120.41

Ayrıca MSE değerleri incelendiğinde, her bir resimde önerilen yönteme göre yüksek bir MSE değeri vardır. İkinci satırda bulunan ev ve kaldırım fotoğrafında ise HISTEQ yöntemi CLAHE'ye göre yüksek bir kontrast artırımı gerçekleştirmiştir. 1166.67 oranındaki yüksek MSE ve %71'lik benzerlik oranı ile (SSIM değeri) başarısız bir sonuç elde edilmiştir. Önerilen yöntemde hem düşük hata oranı hem de yüksek bir benzerlik oranı yakalanmıştır.

Tablo 5'te gösterildiği gibi, DDA-HE, ortalama kontrast değerleri hemen hemen aynı olduğunda PSNR, MSE ve SSIM açısından mevcut iki yönteme göre başarılıdır. Ek olarak, test görüntülerinde bir gürültü faktörü olduğundan, histogram eşitleme sırasında gürültü de artırılmaktadır. Bu nedenle, karşılaştırma ölçütü olarak kontrast değerleri kullanılamaz; ancak, diğer üç kalite ölçütünü karşılaştırmak için referans değer olarak kullanılabilir. Tablo 6, karşılaştırmalı sonuçları aşağıdaki gibi göstermektedir:

Tablo 6. DDA-HE için, Gri Tonlama (a) ve RGB (b) için ölçümlerin ortalama değerleri, Gri Tonlama (c) ve RGB (d) için ortalama standart sapmalar. $\alpha = 1.75$ (For DDA-HE, mean values of measurements for Grayscale (a) and RGB (b), mean standard deviations for Grayscale (c) and RGB (d), $\alpha = 1.75$)

	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast
CLAHE	10.47	1450.73	0.72	108.01
HISTEQ	10.46	1454.95	0.72	117.90
DDA-HE	15.33	732.49	0.85	108.66

(a)

	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast
CLAHE	10.46	1454.95	0.72	107.59
HISTEQ	9.31	2489.55	0.57	117.39
DDA-HE	13.94	884.47	0.77	108.21

(b)

	Standart Sapma			
	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast
CLAHE	3.19	690.07	0.06	23.84
HISTEQ	3.11	617.77	0.07	6.34
DDA-HE	7.10	702.10	0.14	15.98

(c)

	Standart Sapma			
	PSNR	MSE	SSIM	Kontrast
CLAHE	3.11	617.77	0.07	25.57
HISTEQ	5.80	2137.47	0.20	5.55
DDA-HE	5.91	818.12	0.16	16.74

(d)

Tablo 6'daki deneysel sonuçlara ve kıyaslama çalışmasına göre, DDA-HE hem gri tonlamalı hem de RGB görüntü formatlarında en iyi performansı göstermektedir. Performans PSNR, MSE, SSIM ve Kontrast değerleri ile ölçülür; ancak, yöntemler benzer kontrast değerlerine sahip olduğunda değerlendirme yapılabilir. Gri ölçekli görüntülerde, kontrast değerleri 108 civarında olduğunda, önerilen DDA-HE yöntemi %85 SSIM oranına ulaşırken, CLAHE ve HISTEQ yöntemleri %72 SSIM oranına ulaşmaktadır. Bu, DDA-HE'nin orijinal görüntüye göre yapısal benzerliğinin CLAHE ve HISTEQ yöntemlerinden çok daha fazla koruduğunu gösterir. Ek olarak, ortalama kare hata (MSE), CLAHE (1450.73) ve HISTEQ (1454.95) değerlerinin neredeyse yarısı olarak ölçülür. Görüntü kalitesi, önerilen yöntemin diğer iki yöntemle göre öncülük ettiği PSNR metriğiyle de ölçülebilir. RGB görüntülerde, önerilen DDA-HE yönteminin Tablo 6 (b) 'ye göre en iyi performansı gösterdiği görülmektedir. Bu konuda; Önerilen DDA-HE yönteminin, orijinal görüntülerle yapısal benzerliği ve gürültüye karşı sağlamlığı korumak açısından geleneksel histogram eşitleme yönteminden (HISTEQ) ve CLAHE'den daha iyi olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır.

4. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışmada, histogram eşitleme işlemine Değiştirilmiş Ayrık Haar Dalgacık Dönüşümü (HWT) uygulayan bir görüntü iyileştirme yaklaşımı sunulmuştur. Sunulan yöntemin amacı, aynı zamanda histogramı eşitlerken görüntü kalitesini arttırmaktır. Kalite korunumu için, Değiştirilmiş Ayrık HWT'ye dayalı yeni bir yöntem sunulmaktadır. Önerilen DDA-HE yönteminde, gürültünün ve parazitlerin genellikle yüksek dinamik aralığında var olduğunu dikkate alınarak yüksek frekanslar belirli bir alfa hiper parametresi ile baskılanmıştır. Frekans alanında yapılan bu işlem geri dönüşüm işleminde karşımıza kontrast kazancı olarak çıkmaktadır. Literatürde var olan diğer yöntemlerle deneysel çalışmalarla kıyaslama yapıldığında yüksek bir başarımla elde edildiği görülmüştür.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, İstanbul Rumeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimince BAP2019004 nolu proje kapsamında desteklenmiş olup teşekkürlerimizi arz ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Bharadi, V.A.; Padole, L., 2017. Hybrid wavelet transform I and II combined with Contrast limited adaptive histogram equalization for image enhancement. In: Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), 1-7.
- Brown, J., Somo, S., Brooks, F., Komarov, S., Zhou, W., Anastasio, M., & Brey, E., 2020. X-ray CT in phase contrast enhancement geometry of alginate microbeads in a whole-animal model. Annals of biomedical engineering, 48(3), 1016-1024.

- Bulut, F., 2021. Low dynamic range histogram equalization (LDR-HE) via quantized Haar wavelet transform. *The Visual Computer*, 1-17.
- Chenand, S.-D. A.Ramli, 2003. "Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in Contrast enhancement," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 49, 1310-1319.
- Daniel, Ebenezer; Anitha, J., 2016. Optimum wavelet based masking for the Contrast enhancement of medical images using enhanced cuckoo search algorithm. *Computers in biology and medicine*, 71: 149-155.
- Dang Quoc, H. and Nguyen Doan, C., 2022. An Effective Hybrid Algorithm Based on Particle Swarm Optimization with Migration Method for Solving the Multiskill Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*.
- Das, P., & Das, A., 2020. Adaptive Gabor Filtering using Grey Wolf Optimization for Enhancement of Brain MRI. In *2020 IEEE International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)*, 356-359.
- Dongwook Cho, Tien D. Bui., 2014. Fast image enhancement in compressed wavelet domain, In *Signal Processing*, Volume 98, 295-307.
- Fujioka, T., Yashima, Y., Oyama, J., Mori, M., Kubota, K., Katsuta, L., ... & Tateishi, U., 2021. Deep-learning approach with convolutional neural network for classification of maximum intensity projections of dynamic Contrast-enhanced breast magnetic resonance imaging. *Magnetic Resonance Imaging*, 75, 1-8.
- Gonzalez, Rafael C., Richard E. Woods, *Digital Image Processing (4th Edition)*, March 2017, Pearson Publishing.
- Ince, I.F., Bulut, F., Kilic, I., Yildirim, M.E. and Ince, O.F., 2022. Low dynamic range discrete cosine transform (LDR-DCT) for high-performance JPEG image compression. *The Visual Computer*, 1-26.
- Iqbal, M.Z., Ghafoor, A., Siddiqui, A.M., Riaz, M.M., Khalid, U., 2014. Dual-tree complex wavelet transform and SVD based medical image resolution enhancement, In *Signal Processing*, Volume 105, 430-437.
- Huang, S.C. and Yeh, C.H., 2013. Image contrast enhancement for preserving mean brightness without losing image features. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(5-6), 1487-1492.
- Janan, F., & Brady, M., 2021. RICE: A method for quantitative mammographic image enhancement. *Medical image analysis*, 102043.
- Jang, C.Y., Kang, S.J. and Kim, Y.H., 2016. Adaptive Contrast enhancement using edge-based lighting condition estimation. *Digital Signal Processing*, 58, 1-9.
- Jenifer, S., Parasuraman, S. and Kadirvelu, A., 2016. Contrast enhancement and brightness preserving of digital mammograms using fuzzy clipped contrast-limited adaptive histogram equalization algorithm. *Applied Soft Computing*, 42, 167-177.
- Jose, J., Gautam, N., Tiwari, M., Tiwari, T., Suresh, A., Sundararaj, V., & Rejeesh, M. R., 2021. An image quality enhancement scheme employing adolescent identity search algorithm in the NSSST domain for multimodal medical image fusion. *Biomedical Signal Processing and Control*, 66, 102480.
- Kaur, A., Singh, C., 2017. Contrast enhancement for cephalometric images using wavelet-based modified adaptive histogram equalization. *Applied Soft Computing*, 51: 180-191.
- Kim, S.E., Jeon, J.J. and Eom, I.K., 2016. Image contrast enhancement using entropy scaling in wavelet domain. *Signal Processing*, 127, 1-11.
- Kim, Y.T., 1997. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization. *IEEE transactions on Consumer Electronics*, 43(1), 1-8.
- Larson, E.C. and Chandler, D.M., 2010. Most apparent distortion: full-reference image quality assessment and the role of strategy. *Journal of electronic imaging*, 19(1), p.011006.
- Lecca, M., Rizzi, A. and Serapioni, R.P., 2021. An Image Contrast Measure Based on Retinex Principles. *IEEE Transactions on Image Processing*, 30, 3543-3554.
- Lidong, H., Wei, Z., Jun, W. and Zebin, S., 2015. Combination of contrast limited adaptive histogram equalisation and discrete wavelet transform for image enhancement. *IET Image Processing*, 9(10), 908-915.
- Liu, Y.F., Guo, J.M. and Yu, J.C., 2016. Contrast enhancement using stratified parametric-oriented histogram equalization. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 27(6), 1171-1181.
- Luque-Chang, A., Cuevas, E., Pérez-Cisneros, M., Fausto, F., Valdivia-Gonzalez, A. and Sarkar, R., 2021. Moth swarm algorithm for image contrast enhancement. *Knowledge-Based Systems*, 212, p.106607.
- Malik, R., Pande, S., Khamparia, A., & Bhushan, B., 2021. 3 Contrast enhancement approach for satellite images using hybrid fusion technique and artificial bee colony optimization. In *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, 33-54.
- Nithyananda, C. R., et al., 2016. Survey on Histogram Equalization method based Image Enhancement techniques. In: *Data Mining and Advanced Computing (SAPIENCE)*, International Conference on. IEEE, 150-158.
- Sahu, S., Singh, A.K., Ghrera, S.P. and Elhoseny, M., 2019. An approach for de-noising and contrast enhancement of retinal fundus image using CLAHE. *Optics & Laser Technology*, 110, 87-98.
- Shaik, A. and Thanikaiselvan, V., 2021. Comparative analysis of integer wavelet transforms in reversible data hiding using threshold based histogram modification. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 33(7), 878-889.

- Spille, D. C., Adeli, A., Sporns, P. B., Heß, K., Streckert, E. M. S., Brokinkel, C., ... & Brokinkel, B., 2021. Predicting the risk of postoperative recurrence and high-grade histology in patients with intracranial meningiomas using routine preoperative MRI. *Neurosurgical review*, 44(2), 1109-1117.
- Tung, T. C., & Fuh, C. S., 2021. ICEBIN: Image Contrast Enhancement Based on Induced Norm and Local Patch Approaches. *IEEE Access*, 9, 23737-23750.
- Wang, Y., Q. Chen, and B. Zhang., 1999. "Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 45, 68-75.
- Yelmanova, E. and Romanyshyn, Y., 2017, February. Histogram-based method for image contrast enhancement. In *2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, 165-169.



ÇOK AMAÇLI EVRİMSEL ALGORİTMALAR İLE FİLTRE TASARIMI

Ahmet ULUSLU*

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Alçak Geçiren Filtre,
ABA,
ÇAEA/A
DEA,
GKAA,
Çok Amaçlı Optimizasyon.*

Öz

Birçok iletişim sistemi, radyo frekans (RF) filtreleriyle sinyal işleyen bir radyo frekans ön ucuna ihtiyaç duyar. Mikroşerit filtreler bunu gerçekleştirebilmenin oldukça düşük maliyetli ve kolay bir yöntemidir. Filtreler, mikrodalga teknolojisini kullanan uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. Aynı zamanda mikroşerit filtreler, GSM (900MHz,1800MHz), WLAN (2,45GHz), WİMAX (3,5GHz) vb. kablosuz ve mobil haberleşme sistemlerindeki gelişmelerle beraber yoğun olarak kullanılmaktadır. Kullanılabilir boyut, yüksek performans ve düşük maliyet gibi ortaya atılan kriterleri karşılamak için milimetre ve mikrodalga sistemlere artan büyük bir ilgi vardır. Bu makalede, dizi (filtre kat sayısı) $n = 8-12$ arası değişen değerler için 1,6 mm dielektrik yüksekliğine sahip, geçirgenlik 4,4 değeri için WLAN (2,45GHz) ve WİMAX (3,5GHz) frekansında çalışan mikroşerit düzeni kullanılarak düşük maliyetli ve düşük ekleme kayıplı S-bant alçak geçiren filtrenin (AGF) tasarımını evrimsel algoritmalar ile kolaylaştırılmasını göstermektedir. Bu çalışmada standart yapılanlara ek olarak değişken filtre kat sayısı ve simetri durumu problemin zorluk derecesini bir basamak daha ileri götürmektedir. Tasarım simülasyonu, MATLAB programı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Tasarım sonucunda algoritmaların başarı grafiklerinin yanı sıra her algoritma için tasarlanan filtrenin S_{11} ve S_{21} (dB) parametreleri MATLAB programı ile çizdirilmiştir. En başarılı sonuç olan diferansiyel evrim algoritması ile yapılan optimizasyon ile elde edildiği görülmüş ve farklı bir frekans bandı için ayrıca bir yapılmıştır.

FILTER DESIGN WITH MULTI-OBJECTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHMS

Keywords

*Low Pass Filter,
FFA,
MOEA/D
DEA,
CSA,
Multi-Objective Optimization.*

Abstract

Many communication systems require a radio frequency front end that processes signals with radio frequency (RF) filters. Microstrip filters are a very low cost and easy way to do this. Filters have an important place in applications using microwave technology. Also, microstrip filters, GSM (900MHz, 1800MHz), WLAN (2.45GHz), WİMAX (3.5GHz) etc. It is used extensively with the developments in wireless and mobile communication systems. There is a growing interest in millimeter and microwave systems to meet the criteria put forward such as usable size, high performance and low cost. In this article, the array (filter coefficient) has a dielectric height of 1.6 mm for values ranging from $n = 8-12$, using a microstrip scheme operating at WLAN (2.45GHz) and WİMAX (3.5GHz) frequencies for a transmittance value of 4.4. It shows that the design of a low cost and low insertion loss S-band low-pass filter (LPF) is facilitated by evolutionary algorithms. In this study, in addition to the standard ones, the variable filter coefficient and symmetry situation take the difficulty level of the problem one step further. Design simulation is carried out using the MATLAB program. As a result of the design, the S_{11} and S_{21} (dB) parameters of the filter designed for each algorithm, as well as the success graphs of the algorithms, were drawn with the MATLAB program. It was seen that the most successful result was obtained with the optimization made with the differential evolution algorithm and another one was made for a different frequency band.

Alıntı / Cite

Uluslu, A., (2022). Çok Amaçlı Evrimsel Algoritmalar ile Filtre Tasarımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 201-216.

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

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
A. Uluslu, 0000-0002-5580-1687	Başvuru Tarihi / Submission Date	09.05.2021
	Revizyon Tarihi / Revision Date	26.08.2021
	Kabul Tarihi / Accepted Date	01.10.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

İlerleyen teknoloji ile birlikte mikrodalga iletişim sistemleri daha büyük bant genişliği ve daha küçük cihaz boyutu gibi geleneksel kablosuz bağlantılara göre birçok avantaj sağlayabilmek için S-bandı gibi daha yüksek frekanslara doğru ilerlemektedir. Bu tür sistemler için filtreler ise mikroşerit hatlar ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmanın temel amacı farklı evrimsel algoritmalar ile en optimum sonucu veren filtrenin boyutlarını tespit edebilmektir. Bir diğer amacımız ise gerekli tasarlanmış parametrelerin (kesme frekansı ve dönüş kaybı gibi) elde edilmesinde yüksek doğruluk elde etmektir. Filtreler, bir mikrodalga sisteminin birincil ve gerekli bileşenlerinden biridir. Mikroşerit serisi, düşük maliyeti, kompakt boyutu, hafifliği, düzlemsel yapısı ve tek bir kart üzerindeki diğer bileşenlerle kolay entegrasyon avantajları nedeniyle filtre tasarımı için iyi bir adaydır. Eşit dalgalanma ve butterworth düşük geçişli filtreler gibi geleneksel filtre yapıları, özel üretim yöntemlerinin bir gereğidir. Üretim için geleneksel düşük frekans teknikleri, ilişkili çok yüksek kayıplar nedeniyle bu frekanslara uymamaktadır. Tasarım ve simülasyon, MATLAB programı kullanılarak belirlenen giriş parametreleri ile optimize edilen çok amaçlı evrimsel algoritmalar ile yapılmıştır. Bir sonraki bölümde kaynak araştırması yapılacaktır. Akabinde önerilen yöntem başlığı altında filtre tasarımı için kullanılan matematiksel model gösterilerek optimizasyonda kullanılacak olan evrimsel algoritmalar tanıtılacaktır. Aynı başlık altında amaç ve maliyet fonksiyonlarının belirlenmesinden sonra yapılan çalışma kısmı sunulacaktır. Sonuçlarımız, tüm filtre tiplerinde kullanılabilecek bazı önerilerle birlikte sonuç ve tartışma bölümünde özetlenecektir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Mikrodalga filtreler, GSM (900MHz,1800MHz), WLAN (2.45GHz), WİMAX (3.5GHz) vb. mobil iletişim için birçok yeni radyo frekansı (RF) bandı 3GPP'de standart hale geldi ve bununla birlikte, mobil terminallerdeki RF filtrelerinin ve çoklayıcıların daha yüksek performans gereksinimlerini güçlendirdi. Örneğin düşük kayıp, yüksek seçicilik, iyi sıcaklık kararlılığı, geniş çalışma frekans aralığı vs. son yıllarda, Uzun Vadeli Evrim (LTE) bantlarının merkez frekansları, 2,7 GHz'in altındaki geleneksel bantlardan mobil iletişim endüstrilerinde ultra yüksek bant (UHB) olarak adlandırılan daha yeni 3 GHz aralığına uzanmaktadır (Kale vd., 2013). UHB filtreleme cihazları olarak, şu anda mobil terminallerde çok katmanlı düşük sıcaklıkta birlikte pişirilen seramik (LTCC) teknolojisi ve entegre pasif cihazlar (IPD) kullanan LC filtreleri kullanılmaktadır (Liu vd., 2009). Ancak UHB bandındaki frekans sıklığına göre kompakt boyutta daha dik etekli ve daha düşük ekleme kayıplı yüksek performanslı filtrelere ihtiyaç duyulmuştur. Son zamanlarda, çok ince bir piezoelektrik katmanlar kullanan yeni tip yüzey akustik dalgası cihazlarının bir yüzey enerjisi sınırlama etkisi gösterdiği ve toplu akustik dalgadan daha büyük veya ona eşit olan son derece yüksek bir kalite gerçekleştirdiği bildirilmiştir. Ultra geniş bantlı (UWB) sistemler, düşük güç tüketimi ve yüksek veri iletim hızları ile kısa mesafeler için çok geniş frekans bant seçenekleri üzerinden veri iletimini başarı ile gerçekleştirebilmektedir. Bu uygulamaların tasarımı karmaşık olması sebebi ile ve gelişen iletişim sistemlerine artan talep nedeni ile endüstriyel uygulamalarda ve dolayısı ile akademik çalışmalarda popülerliğini sürdürmektedir (Wells vd., 2009). Son yıllarda evrimsel optimizasyon algoritmaları mühendislik alanında tasarım optimizasyon problemleri için sıklıkla kullanılmaktadır (Güneş vd., 2014; Güneş vd., 2015). Özellikle giriş parametre sayısının fazla olduğu ve bu parametreler arasındaki ilişkinin karmaşıklığı doğadan esinlenen pek çok meta-sezgisel optimizasyon algoritması türemesine neden olmuştur. Bunlar arasında oldukça yaygın olarak kullanılan ateş böceği, diferansiyel evrim ve guguk kuşu arama algoritmaları birçok farklı problem için kullanılmıştır (Storn vd., 1997; Yıldırım vd., 2016). Filtrelerin yanı sıra anten optimizasyonu, transistor parametrelerinin optimizasyonu vb. birçok alanda kullanılmaktadır (Yıldırım vd., 2017; Güneş vd., 2017). Bir çalışmada bu çalışmadakine benzer geometriye sahip sabit 10 katmanlı bant geçiren filtrenin yalnızca bir algoritma ile optimizasyonu konusu işlenmiştir (Yıldırım vd., 2017). Burada katman sayısının sabit olması daha optimum sonuçların bulunmasına engel teşkil edebileceği düşünülerek bu çalışmada katman sayısı da değişken olarak eklenmiştir. Ayrıca sadece bir algoritma kullanılmış olması kıyaslama yapılmasına engeldir. Yine güncel bir çalışmada farklı geometrik yapıya sahip bant geçiren filtrenin modellenmesi konusu işlenmiştir (Mahouti vd., 2021). Bu çalışmadaki maliyet fonksiyonları seçimi bu yapılan çalışmadaki maliyet fonksiyon seçiminin doğruluğunu kanıtlar niteliktedir. Yapılan çalışmada WLAN (2,45GHz) ve WİMAX (3,5GHz) alçak geçiren bir filtrenin farklı optimizasyon algoritmalarıyla modellenmesi üzerine çalışılmıştır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Alçak geçiren filtrelerin tasarımı iki ana adımdan oluşur. İlki, uygun bir düşük geçiş prototipi seçmektir. Geçiş bandı dalgalanması ve reaktif elemanların sayısı (filtrenin sırası) dahil olmak üzere yanıt türünün seçimi, gerekli özelliklere bağlı olacaktır. Genellikle bir kaynak empedansı $g_0 = 1$ ve bir kesme frekansı $\Omega_c = 1.0$ yapmak için normalize edilen düşük geçişli prototip filtrelerin eleman değerleri, daha sonra istenen kesme frekansı ve istenen kaynak empedansı için LC elemanlarına dönüştürülür. Mikroşerit filtreler için normalde 50 ohm. Mikroşerit alçak geçiren filtrelerin (Pozar vd., 2000) tasarımındaki bir sonraki ana adım, topaklanmış eleman filtresine yaklaşan uygun bir mikroşerit gerçekleştirme bulmaktır. Geçiş bandı dalgalanma faktörü $LAR = 0.1dB'$ de maksimum düz yanıt düşük geçişli prototip için eleman değerleridir. Karakteristik empedans kaynağı / yük $Z_0 = 50$ ohm, g_i ($g_1, g_2, g_3, g_4 \dots g_n$) normalleştirilmiş değerlerden alınmıştır. Filtrenin, dielektrik sabiti ϵ_r ve alt tabaka kalınlığı (h) mm olan bir substrat üzerinde imal edildiği varsayılır (JiaShen vd., 2001).

Filtre Özellikleri:

Dielektrik sabiti (ϵ_r) = 4,4

Alt tabaka yüksekliği (h) = 1,6 (mm)

Kesme frekansı = 3,5 (GHz)

Kayıp teğet $\tan\delta = 0,02$

Filtre empedansı $Z_0 = 50\Omega$

En yüksek hat empedansı $Z_Y = Z_{OY} = 120\Omega$

En düşük hat empedansı $Z_D = Z_{OD} = 20\Omega$ olarak seçilir.

Seçilen parametreler literatür taramasında gösterilen ve en yaygın olarak kullanılan özelliklerdir. Bu parametreler ile geniş bantlı bir filtrenin tasarımı için her bir iletim hattının ABCD parametreleri aşağıda verilen denklem (1) ile elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_0 \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_0} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \quad (1)$$

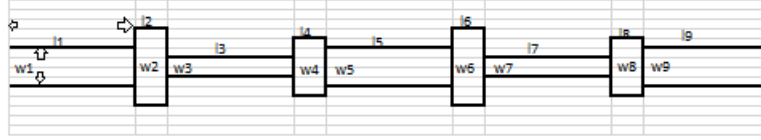
Tasarım için kullanılacak olan N adet (8-12 arası değişken) iletim hattının her bir tanesine ait ABCD parametreleri çarpılarak ABCD matris parametreleri bulunabilir. Bu bulunan eşdeğer ABCD parametreleri ile aşağıda verilen denklemler (2,3) yardımı ile bu parametrelere karşılık gelen S_{11} ve S_{21} değerleri rahatlıkla hesaplanabilir, daha sonra bulunan sonuç dB değere çevrilir.

$$S_{11} = \frac{AZ_{N2} + B - CZ_{N1}^* Z_{N2} - DZ_{N1}^*}{AZ_{N2} + B + CZ_{N1} Z_{N2} + DZ_{N1}} \quad (2)$$

$$S_{21} = \frac{2\sqrt{\text{Re}\{Z_{N1}\} \text{Re}\{Z_{N2}\}}}{AZ_{N2} + B + CZ_{N1} Z_{N2} + DZ_{N1}} \quad (3)$$

3.2. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Bu çalışmada, bir ultra geniş bant mikroşerit filtresinin tasarım optimizasyon problemini çözmek için mühendislik problemlerinde yaygın olarak kullanılan ateşböceği (AB), ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritma (MOEA/D), diferansiyel evrim (DE) ve guguk kuşu arama (GKA) algoritmaları ele alınacaktır. Bunlar literatür taramasında da belirtilen ve yaygın olarak kullanılan algoritmalarından seçilmiştir. Tasarım optimizasyon problemi için mikroşerit filtrenin elektriksel uzunluğu (g_i), kullanılacak iletim hattı sayısı (filtre kat sayısı= n) ve hattın simetrik (simetri durumu: 1. ve N., 2. ve N-1, 3 ve N-2. aynı boyuta sahip olması) olup olmaması değişkenleri kullanılır. Burada filtre kat sayısı algoritma içerisinde rastgele olarak verilen aralıkta seçilmekte ve her adımda otomatik olarak değişmektedir. Optimizasyon sonucu en başarılı sonuçtaki eleman sayısı baz alınmaktadır. Filtre şematik olarak çizilecek olursa, örnek olarak 9 elemanlı bir yapı Şekil 1'de gösterilmiştir. İlk olarak her bir hattın ABCD parametreleri elde edilir. Akabinde eşdeğer devre ABCD parametreleri kullanılarak saçılma parametreleri elde edilir. Daha sonra hep bir frekans adımı için maliyet fonksiyonu hesaplanır ve toplanır. Sonuç olarak en düşük maliyet fonksiyonuna sahip sonuç tasarım sonucu olarak simüle edilerek sonuçlar sunulur (Belen vd., 2014; Yang vd., 2009; Yang vd., 2010; Wang vd., 2012; Yang vd., 2009; Güneş vd., 2016; Storn vd., 1997; Das vd., 2009; Das vd., 2011).



Şekil 1. Ultra geniş bant 9 elemanlı mikroşerit filtrenin şematik görünümü (Schematic view of ultra-wideband 9-element microstrip filter)

Aşağıdaki alt bölümlerde ateşböceği (AB), ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel (MOEA/D), diferansiyel evrim (DE), guguk kuşu arama (GKA) optimizasyon algoritmaları kısaca özetlenmektedir.

3.2.1. Evrimsel Algoritmalar (Evolutionary Algorithms)

3.2.1.1. Ateşböceği (Firefly)

Ateşböceği (AB) algoritması, Yang (Belen vd., 2014; Yang vd., 2009) tarafından geliştirilen, doğadaki ateş böceklerinin parlama davranışından esinlenen evrimsel bir optimizasyon algoritmasıdır. Ateşböceği algoritmasında iki önemli özellik vardır, Bunlar: Parlaklık yani ışık yoğunluğu (I) ve çekiciliktir (β).

Ateşböceği algoritmasında üç standart kural vardır:

- (i) Bir ateş böceğinin parlaklığı, belirli bir problemin $f(x)$ amaç fonksiyonunun değeriyle belirlenir. Bir küçültme problemi için parlaklık, amaç fonksiyonu $I(x) \propto 1 / f(x)$ değeriyle ters orantılı olabilir.
- (ii) Bir ateş böceğinin çekicilik derecesi parlaklığı ile orantılıdır. Sabit ışık soğurma katsayısına sahip belirli bir ortamın üssel soğurması nedeniyle mesafe arttığında parlaklık azalacaktır:
- (iii)

$$I = I_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (4)$$

Herhangi iki ateşböceği arasındaki mesafe nerede ve sırasıyla

$$r_{ij} = \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^D (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (5)$$

Burada D , optimizasyon değişken vektörünün boyutudur; I_0 , ateş böceğinin maksimum parlaklığıdır. Bir ateş böceğinin hareket ettiği mesafe çekiciliğe göre belirlenir. Ateşböceğinin çekiciliği β şu şekilde tanımlanır:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (6)$$

β_0 $r = 0$ 'daki çekiciliktir.

- (iv) Tüm ateşböcekleri üniseks ve cinsiyetlerine bakılmaksızın daha çekici ve daha parlak olanlara doğru hareket edecekler. Belirli bir ateşböceğinden daha parlak veya daha çekici bir ateşböceği yoksa, rastgele hareket edecektir. Böylece bir ateşböceğinin hareketi i daha çekici (daha parlak) başka bir ateşböceğine çekilir yani j tarafından belirlenir.
- (v)

$$\vec{x}_i^{t+1} = \vec{x}_i^t + \beta(\vec{x}_j^t - \vec{x}_i^t) + \alpha_t \vec{\epsilon}_i \quad (7)$$

$\beta_0=1$ ve $\epsilon_i \in [-1/2, 1/2]$ şeklinde eşit olarak dağıtılmış rastgele sayıların bir vektörü ve α_t rasgele dağıtım faktörü olduğunda, genellikle (Yang vd., 2013)'de olduğu gibi her ardışık yinelemede azaltılır, ancak bu çalışmada rastgele $\alpha_t \in [0, 1]$ seçilir.

3.2.1.2. Ayrıştırmaya Dayalı Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma (Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition)

Ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritma (MOEA/D), bu yazıda kullanılan bir diğer algoritma, incelenen çok amaçlı optimizasyon problemini ayrıştırmalıdır. Herhangi bir ayrıştırma yaklaşımı bu amaca hizmet edebilir. Aşağıdaki açıklamada, Tchebycheff yaklaşımının kullanıldığını varsayıyoruz. Diğer ayrıştırma yöntemleri kullanıldığında aşağıdaki MOEA/D'yi değiştirmek çok önemsizdir. Eşit yayılmış ağırlık vektörleri kümesi olsun ve referans noktası olduğu varsayılır. MOEA/D'de, bir ağırlık vektörünün komşuluğu, içindeki en yakın birkaç ağırlık vektörünün bir kümesi olarak tanımlanır. λ alt probleminin komşuluğu, komşuluğun ağırlık vektörleri ile tüm alt

problemlerden oluşur. Popülasyon, her bir alt problem için şimdiye kadar bulunan en iyi çözümden oluşur. MOEA/D'deki bir alt problemi optimize etmek için sadece komşu alt problemlerine yönelik mevcut çözümler kullanılır. (Zhang vd., 2007)

3.2.1.3. Diferansiyel Evrim (Differential Evolution)

Diferansiyel evrim (DE) algoritması, gerçek değerli sayısal optimizasyon problemlerinin (Güneş vd., 2016; Storn vd., 1997; Das vd., 2009; Das vd., 2011) çözümü için geliştirilmiş popülasyon tabanlı evrimsel bir optimizasyon algoritmasıdır ve bilim ve mühendisliğin çeşitli alanlarından kaynaklanan optimizasyon problemlerine birkaç önemli uygulama bulunmuştur. Geleneksel benzerlerinden farklı olarak, amaç fonksiyon manzarasını keşfetmek için parametre vektörlerinin farkını kullanan çok etkili bir küresel optimizasyon algoritmasıdır. Diferansiyel evrim algoritması, genetik algoritmanın mutasyon, çaprazlama ve seçim stratejilerini, geçiş sabiti $C_r \in (0,1)$, mutasyon ölçek faktörü $F \in (0, 2)$ ve popülasyon boyutu olan çok az sayıda kontrol parametresi ile kullanır. Bu parametrelerin algoritmanın performansı üzerindeki etkileri iyi incelenmiştir. Daha iyi çözümler oluşturmadaki temel farklılık, genetik algoritmaların çapraz geçişe dayanması, diferansiyel evrimin ise mutasyon işlemine dayanmasıdır. Bu ana işlem, popülasyondaki rastgele örneklenmiş çözüm çiftlerinin farklılıklarına dayanmaktadır. Algoritma, aramayı arama alanındaki muhtemel bölgelere yönlendirmek için bir arama mekanizması ve seçim işlemi olarak mutasyon işlemi kullanır. D parametrelerinden oluşan bir optimizasyon görevi, D boyutlu bir vektör ile temsil edilebilir. Diferansiyel evrimde, başlangıçta rastgele bir popülasyon büyüklüğü (NP) çözüm vektörleri popülasyonu oluşturulur. Bu popülasyon, mutasyon, geçiş ve seçim operatörleri uygulanarak başarılı bir şekilde geliştirilir.

3.2.1.4. Guguk Kuşu Arama (Cuckoo Search)

Son zamanlarda, guguk kuşu arama (GKA) Yang ve Deb (Yang vd., 2010) tarafından doğadan ilham alan yeni bir popülasyon tabanlı algoritma olarak sunuldu ve küresel yakınsama özelliklerini garanti ettiği kanıtlandı (Yang vd., 2010; Wang vd., 2012; Yang vd., 2009; Güneş vd., 2016). Standart meta-sezgisel GKA, özellikle çok amaçlı optimizasyon problemleri için maliyetli olduğu, uygunluk fonksiyonunun tekrar tekrar değerlendirilmesini gerektirmeyen ve makul bir süre içinde bir dizi optimum çözüm sağlayabildiği durumlarda, uygunluk işlevinin tekrarlanan değerlendirmelerine ihtiyaç duyar. Guguk kuşu arama, guguk kuşlarının üreme davranışından ilham alan basit ve hızlı yakınsak bir algoritmadır.

Aşağıdaki idealleştirilmiş üç kurala dayanmaktadır:

- (i) Her guguk kuşu bir seferde bir yumurta (aday çözüm) bırakır ve yumurtasını rastgele seçilen bir yuvaya atar.
- (ii) Yüksek kaliteli yumurtalara sahip en iyi yuvalar (daha iyi çözümler) bir sonraki nesle aktarılacaktır.
- (iii) Mevcut konakçı yuvaların sayısı sabitlenir ve bir guguk kuşunun yumurtladığı yumurta, $p_a \in [0, 1]$ olasılığı ile ev sahibi kuş tarafından keşfedilir. Bu durumda, ev sahibi kuş yumurtayı atabilir veya yuvayı terk edip tamamen yeni bir yuva kurabilir.

Kısaca özetlenirse, bir yuvadaki her yumurta bir aday çözümü temsil eder; amaç, yuvalarda pek de iyi olmayan bir çözümü değiştirmek için yeni ve potansiyel olarak daha iyi çözümleri (guguklu yumurtalar) keşfetmektir. Bu çalışmada performans değerlendirme ve karşılaştırma amacıyla $N_p \in (10, 100)$ alınmıştır. Bu üç kurala dayanarak, guguk kuşu aramasının (GKA) temel adımları, Bileşik sağ sol el iletim hattı ultra geniş bant eşleştirme devrelerinin tasarım optimizasyonunda (Güneş vd., 2016)'deki PSO ve GA ile karşılaştırıldığında başarıyla uygulanmıştır.

Guguk i diyelim ki için yeni çözümler üretirken $x(t+1)$, bir Levy uçuşu gerçekleştirilir.

$$\vec{x}_i^{(t+1)} = \vec{x}_i^{(t)} + \alpha \oplus Le'vy(\lambda), \quad (8)$$

$$\vec{\alpha} = \alpha_0 \left(\vec{x}_j^{(t)} - \vec{x}_i^{(t)} \right) \quad (9)$$

eşitliğe alternatif olarak denklem (9), eşitlikteki vektör ise denklem (8)'dir. İlgili problemin ölçekleriyle ilişkili olması gereken adım boyutu olan bir skaler ile devam edilebilir. Çoğu durumda bunu kullanabiliriz. Ürün \oplus , giriş açısından çarpımlar anlamına gelir. Lévy uçuşu ile rastgele yürüyüş, adım uzunluğu vergi dağılımına göre çizildiği için arama alanını keşfetmede daha etkilidir (Yang vd., 2009).

3.2.1.5. Amaç ve Maliyet Fonksiyonları (Objective and Cost Functions)

Filtre ölçüm fonksiyonları arasında, saçılma parametreleri S_{11} ve S_{21} (dB) referans noktaları olarak seçilmiştir. Buna göre aşağıdaki amaç fonksiyonu tanımlanmıştır.

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Eğer } f < f_{kesim} \text{ ise } AF_1 = e^{S_{11} dB} + |S_{21} dB| \quad (10)$$

$$\text{Eğer } f > f_{kesim} \text{ ise } AF_2 = e^{S_{21} dB} + |S_{11} dB| \quad (11)$$

burada f (GHz) mevcut hesaplanan frekans değerimi ve f_{kesim} (GHz) ise filtrenin kesim yapacağı rezonans frekansını göstermektedir. Amaç fonksiyonundaki hedef, geçiren kısımda S_{11} 'in (dB) maksimum, S_{21} 'in (dB) ise minimum olması hedeflenmiştir. Aynı şekilde durduran kısımda ise S_{21} 'in (dB) maksimum, S_{11} 'in (dB) ise minimum olması hedeflenmiştir. Maliyet fonksiyonu ise 0,1-8 GHz aralığında 0,1 adım aralığı ile amaç fonksiyonlarının toplamı ile oluşturulur. Amaç fonksiyonu özetle aşağıdaki gibi tek bir maliyet fonksiyonu oluşturmak için kullanılır:

$$\text{Maliyet} = \sum_{f=0,1}^{f=8,0} AF_1 + AF_2 \quad (12)$$

3,5 GHz veya 2,45 GHz kesim frekansı önceden tanımlanmış performans parametreleri için analiz yapılması gerektiğinden, optimizasyon sürecinde kullanılacak amaç fonksiyonları (10)-(11) seçilmiştir. Belirlenen hedef fonksiyonları ile 10 çalıştırma üzerinden alınan minimum maliyet (12) ile sonuç belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca kullanılan amaç ve maliyet fonksiyonları literatür taramasında verilen örneklerle doğruluğu desteklenmektedir.

Bu optimizasyon sürecinde karar değişkenleri sırasıyla S_{11} ve S_{21} (dB) dir. Filtrenin performans kriterleri Tablo 1'de detaylı gösterilmiştir.

Tablo 1. Çok geniş bantlı filtrenin performans kriterleri (Performance criteria of the multi-band filter)

Frekans (GHz)	İletim Bandı		Durdurma Bandı	
	0	3,5 veya 2,45	3,5 veya 2,45	∞
S_{11} (dB)	$f < -10$		$f = 0$	
S_{21} (dB)	$f = 0$		$f < -10$	

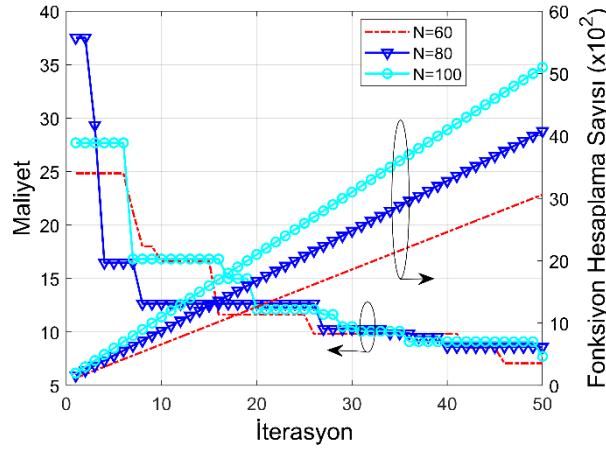
4. Çalışma Kısmı (Study Case)

Optimizasyon algoritmalarının çoğu aramaya başlamadan önce rastgele bir popülasyon üretir. Daha sonra bu popülasyon üyelerini girilen parametre değerleri doğrultusunda iyileştirir. Bu sebepten ötürü seçilen algoritma parametreleri en optimum sonucu bulma konusunda büyük bir önem arz etmektedir. Belirlenen algoritmalar ateşböceği algoritması için ışık soğurma katsayısı (γ) = 0,3, bir ateş böceğinin çekiciliği (β) = 0,5 ve istenen arama hassasiyeti (ϵ_{Req}) = 0,5 olarak alınmıştır. Ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritması için arşiv değeri = 50, çapraz geçiş (C_r) = 0,5 olarak alınmıştır. Diferansiyel evrim algoritması için ise ölçek faktörü (F) = 0,5, çapraz geçiş (C_r) = 0,5 ve arama hassasiyeti (ϵ_{Req}) = 0,5 olarak alınmıştır. Guguk kuşu arama algoritması için ise yumurtlayan yumurtanın konukçu tarafından keşif olasılığı (p_a) = 0,5 ve istenen arama hassasiyeti (ϵ_{Req}) = 0,5 olarak alınmıştır. Bunlara ek olarak her 4 algoritma için ise maksimum iterasyon = 50 ve popülasyon (N) = 60, 80 ve 100 olarak seçilmiştir. Burada maksimum iterasyon yüksek seçilerek tüm algoritmaların doyuma ulaştığı noktayı rahatlıkla görebilmek amaçlanmıştır. Algoritma elektriksel uzunluk (g_i) 0,5-2 arası rastgele bir değer olacak şekilde, hattın eleman sayısı (n) 8-12 arasında herhangi bir değeri alabilecek şekilde rastgele ve simetri durumu (simetri durumu 1. ve N ., 2. ve $N-1$, 3 ve $N-2$ aynı boyuta sahip olması) aktif veya pasif olacak biçimde toplam 14 adet giriş değerine sahiptir. Hattaki eleman sayısı ve simetri durumu her optimizasyon adımında kodun içerisinde belirtilen aralıkta herhangi biri gelecek şekilde seçilir ve her koşu esnasında tekrardan güncellenir. Çıkış değeri olarak ise maliyet fonksiyonunda da kullanılan S_{11} ve S_{21} (dB) seçilmiştir.

4.1. Algoritmalar için İdeal Parametre Seçimi (Optimal Parameter Selection for Algorithms)

Belirlenen 4 algoritma (ateşböceği, ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel, diferansiyel evrim ve guguk kuşu arama) için parametre seçiminin en optimum sonucun bulunması konusundaki önemden bahsetmiştik. Bu bilgiler ışığında çalışmanın bu kısmında popülasyon = 60, 80 ve 100 değerleri için 10 bağımsız koşu (evrimsel veya genetik algoritmalar genelde 10 defa koşturularak en optimum olan tercih edilir) içerisinde seçilen en iyi performansın iterasyona göre tipik maliyet ve fonksiyon hesaplama sayısı (FHS) varyasyonları ateşböceği, ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel, diferansiyel evrim ve guguk kuşu arama algoritması için sırası ile Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'de sunulmuştur. Ayrıca bu grafiklere ek olarak Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'de verilen maliyet ve FHS varyasyonları nümerik olarak Tablo 2, Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5'de gösterilmiştir. Bu grafik tablolarındaki sonuçlardan yola çıkarak ateşböceği ve guguk kuşu arama algoritması için minimum maliyetli sonuç popülasyon (N) = 60, diferansiyel evrim algoritması için minimum maliyetli sonuç popülasyon (N) = 80, ayrıştırmaya dayalı çok

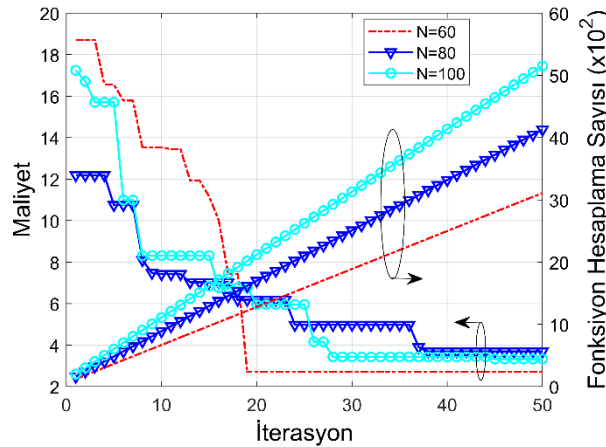
amaçlı evrimsel algoritması için minimum maliyetli sonuç popülasyon (N) = 100 olan optimizasyonunda çıktığı görülmektedir. Ayrıca bir bütün olarak bakıldığında en başarısız algoritmanın guguk kuşu arama, en başarılı olanın ise diferansiyel evrim algoritması olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Ateşböceği algoritması için popülasyona göre 10 çalışmadan seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelenmeli tipik maliyet ve FHS varyasyonları (Typical cost and FEN variations with iteration of the best performance of optimization selected from 10 runs by population for the firefly algorithm)

Tablo 2. Ateşböceği algoritması için popülasyona göre optimizasyonun performans değerlendirmeleri (Performance evaluations of optimization by population for the firefly algorithm)

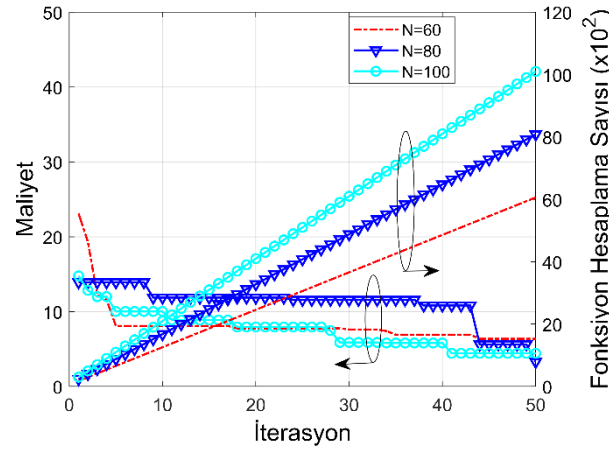
Popülasyon		Minimum	Maksimum	Ortalama
60	Maliyet	7,08	24,84	12,99
	FHS	2820	120	3060
80	Maliyet	8,61	37,52	12,72
	FHS	3280	160	4080
100	Maliyet	7,73	27,69	13,88
	FHS	5100	200	5100



Şekil 3. Ayrıştırılmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritması için popülasyona göre 10 çalışmadan seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelenmeli tipik maliyet ve FHS varyasyonları (Typical cost and FEN variations with iteration of the best performance of optimization selected from 10 runs by population for the multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition)

Tablo 3. Ayrıştırırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritması için popülasyona göre optimizasyonun performans değerlendirmeleri (Performance evaluations of optimization by population for the multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition)

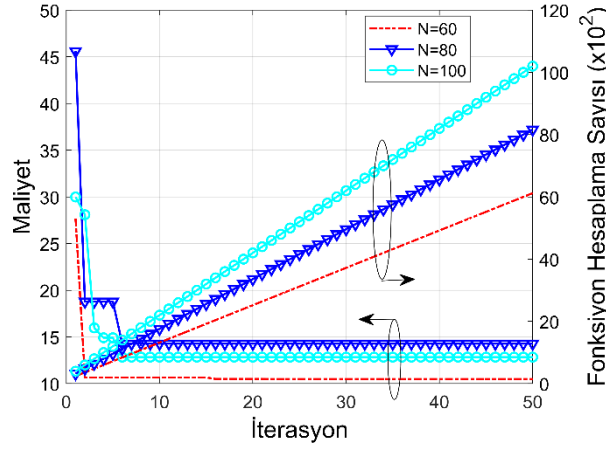
Popülasyon		Minimum	Maksimum	Ortalama
60	Maliyet	6,17	44,26	16,46
	FEN	2866	121	3110
80	Maliyet	6,41	56,37	14,68
	FEN	3320	161	4130
100	Maliyet	5,42	42,23	15,46
	FEN	5150	201	5150



Şekil 4. Diferansiyel evrim algoritması için popülasyona göre 10 çalışmadan seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelenmeli tipik maliyet ve FEN varyasyonları (Typical cost and FEN variations with iteration of the best performance of optimization selected from 10 runs by population for the differential evolution algorithm)

Tablo 4. Diferansiyel evrim algoritması için popülasyona göre optimizasyonun performans değerlendirmeleri (Performance evaluations of optimization by population for the differential evolution algorithm)

Popülasyon		Minimum	Maksimum	Ortalama
60	Maliyet	6,37	23,11	8,19
	FHS	5340	180	6060
80	Maliyet	3,29	13,93	11,08
	FHS	8080	240	8080
100	Maliyet	4,43	14,78	7,51
	FHS	8300	300	10100



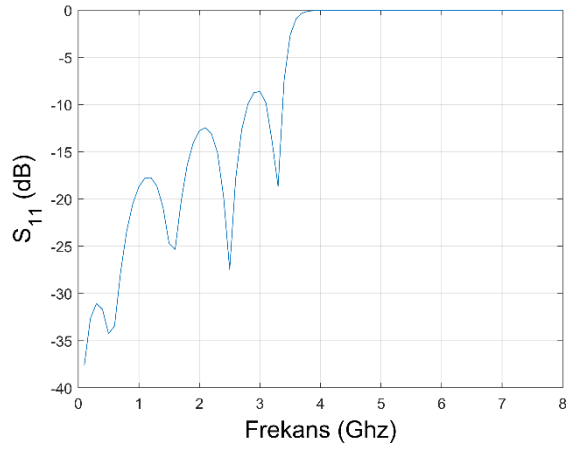
Şekil 5. Guguk kuşu arama algoritması için popülasyona göre 10 çalışmadan seçilen optimizasyonun en iyi performansının yinelemeli tipik maliyet ve FHS varyasyonları (Typical cost and FEN variations with iteration of the best performance of optimization selected from 10 runs by population for the cuckoo search algorithm)

Tablo 5. Guguk kuşu arama algoritması için popülasyona göre optimizasyonun performans değerlendirmeleri (Performance evaluations of optimization by population for the cuckoo search algorithm)

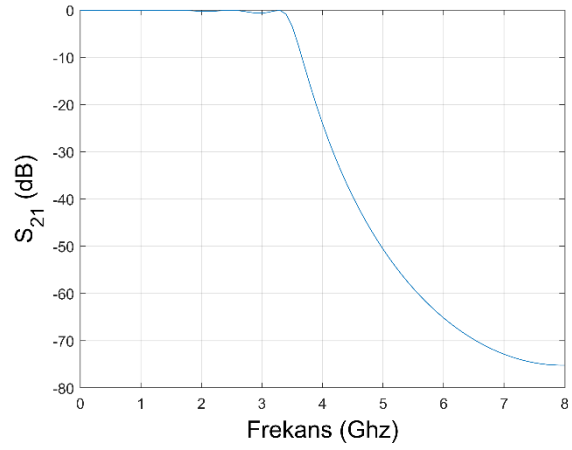
Popülasyon		Minimum	Maksimum	Ortalama
60	Maliyet	10,49	27,67	10,88
	FHS	2760	240	6120
80	Maliyet	14,28	45,60	15,27
	FHS	1120	320	8160
100	Maliyet	12,84	29,99	13,63
	FHS	1400	400	10200

4.2. Alçak Geçiren Filtre için S Parametrelerinin Simülasyonu (Simulation of S-Parameters for Low Pass Filter)

Bir önceki kısımdaki minimum maliyet değerine sahip sonuçların S_{11} ve S_{21} (dB) değerleri 0-8 GHz bant aralığı için simüle edilecektir. Ateşböceği algoritmasının Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de sırası ile popülasyon (N) = 60, 80 ve 100 değerleri için en iyi performansa sahip sonuçları S_{11} ve S_{21} (dB) olarak sunulmaktadır. Belirlenen 3,5 GHz rezonans frekansında popülasyon 80 ve 100 için -10 dB lik iletim ve kesim değeri başarılı olarak sağlandığı görülmektedir. Ayırıştırma dayalı çok amaçlı evrimsel algoritmasının popülasyon (N) = 60, 80 ve 100 değerleri için en iyi performansa sahip sonuçları S_{11} ve S_{21} (dB) değerleri Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de sırası ile gösterilmiştir. Grafiklere göz atıldığında en başarılı sonucun popülasyon değeri 100 için hedeflenen kesim noktasında başarılı olduğu görülmektedir. Diferansiyel evrim algoritmasının popülasyon (N) = 60, 80 ve 100 değerleri için en iyi performansa sahip sonuçları S_{11} ve S_{21} (dB) değerleri Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'de sırası ile gösterilmiştir. Grafiklere göz atıldığında en başarılı sonucun popülasyon değeri 80 için olmasına karşın kesim frekans olarak hedeflenen 3,5 GHz in biraz kaydığı görülmektedir. Guguk kuşu arama algoritması için ise Şekil 15, Şekil 16 ve Şekil 17'de sırası ile popülasyon (N) = 60, 80 ve 100 değerlere sahip S_{11} ve S_{21} (dB) grafikleri gösterilmektedir. Bu algoritma için ise de diğerlerine oranla daha başarısız sonuçlar elde edilmesine karşın kısmen başarılıdır. Tüm bu sonuçlardan da görüleceği üzere popülasyon değerini arttırmak optimizasyonun yükünü arttırırken her zaman en düşük maliyete sahip sonucu garanti etmediği görülmektedir.

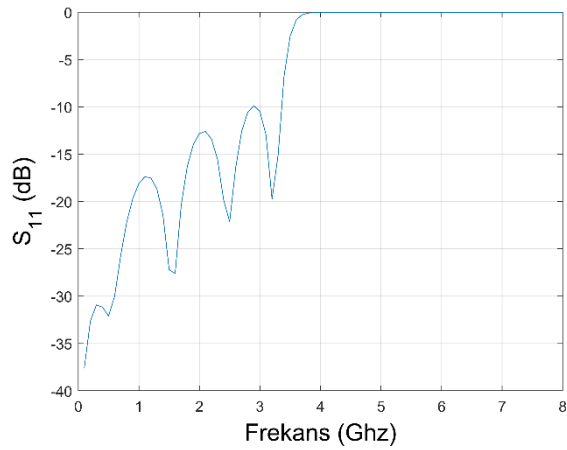


(a)

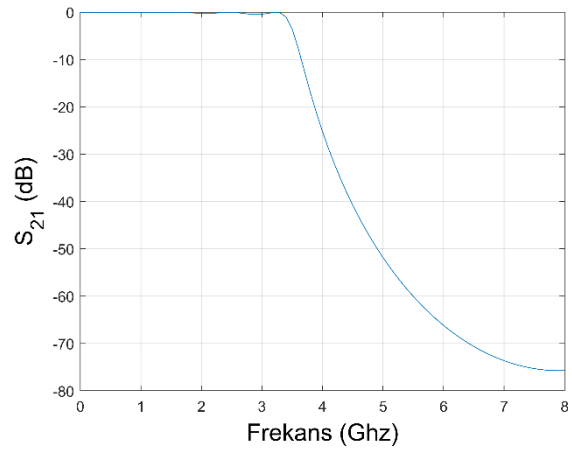


(b)

Şekil 6. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun ateşböceği algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 60) (Using the firefly algorithm based on decomposition of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 60))

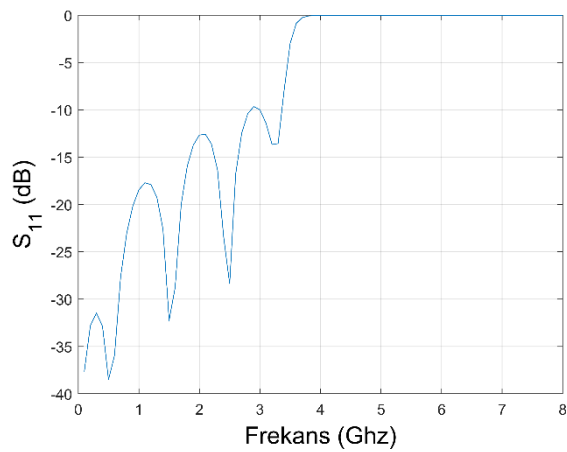


(a)

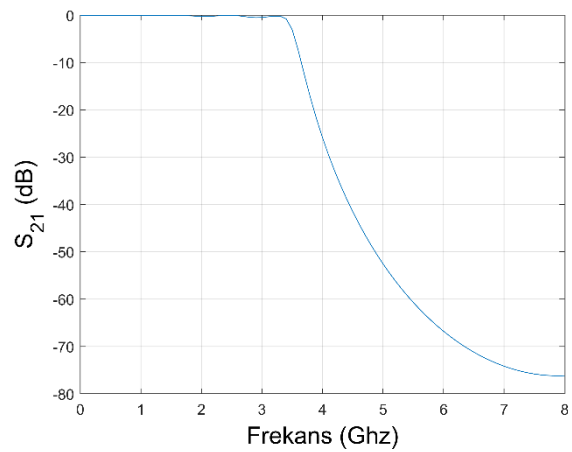


(b)

Şekil 7. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun ateşböceği algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 80) (Using the firefly algorithm based on decomposition of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 80))

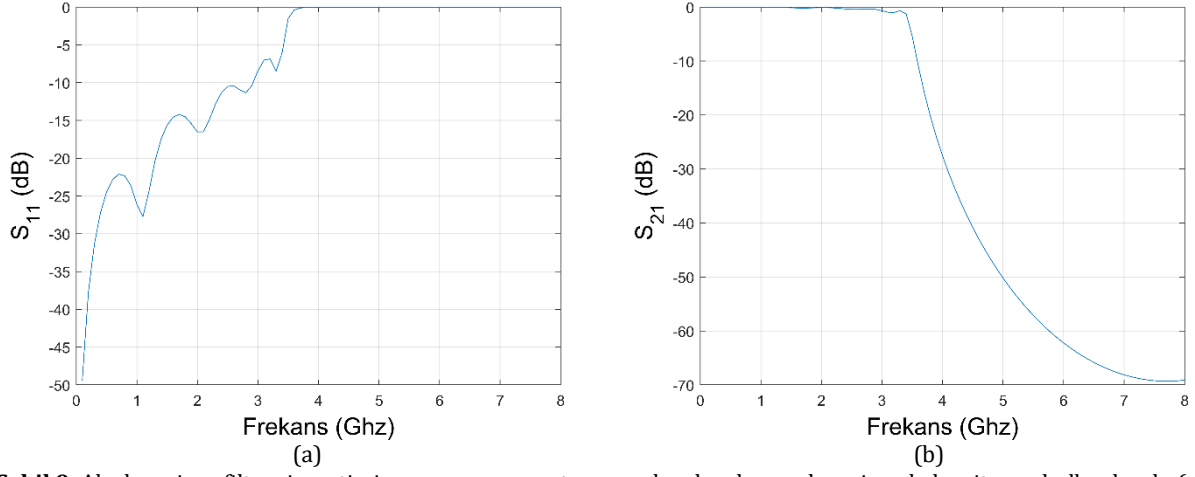


(a)

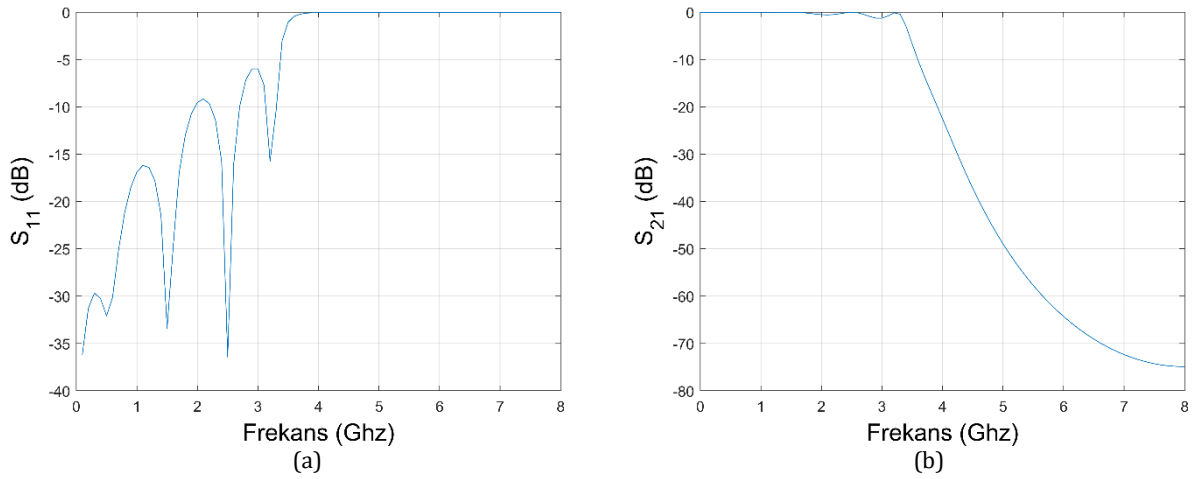


(b)

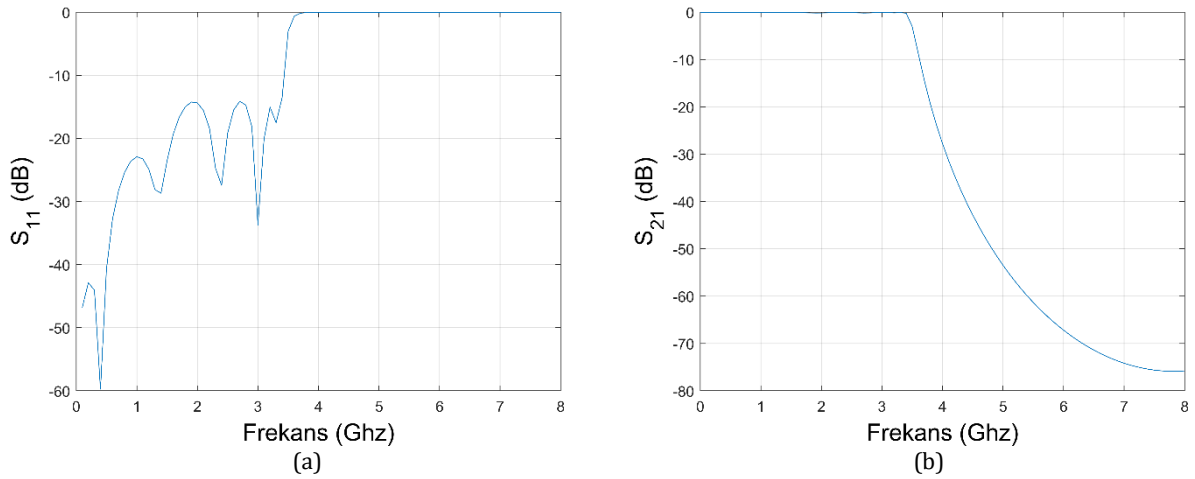
Şekil 8. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun ateşböceği algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 100) (Using the firefly algorithm based on decomposition of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 100))



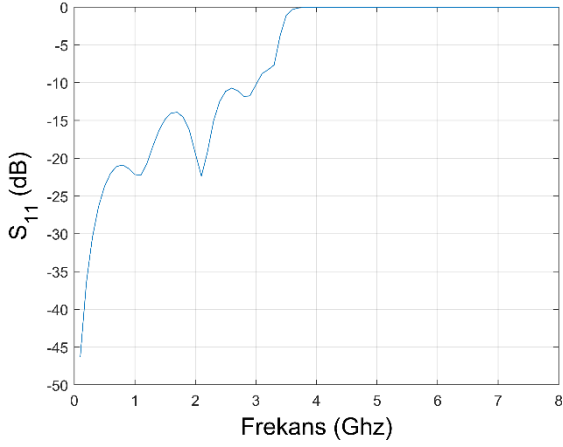
Şekil 9. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 60) (Using the multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 60))



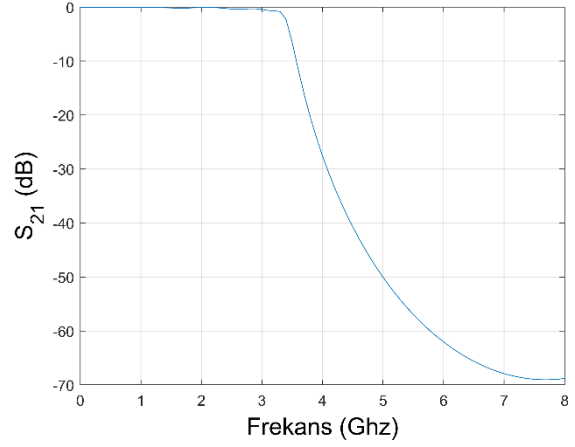
Şekil 10. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 80) (Using the multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 80))



Şekil 11. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrimsel algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 100) (Using the multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 100))

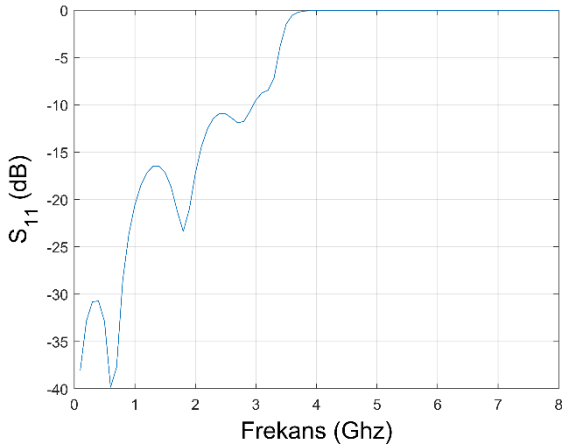


(a)

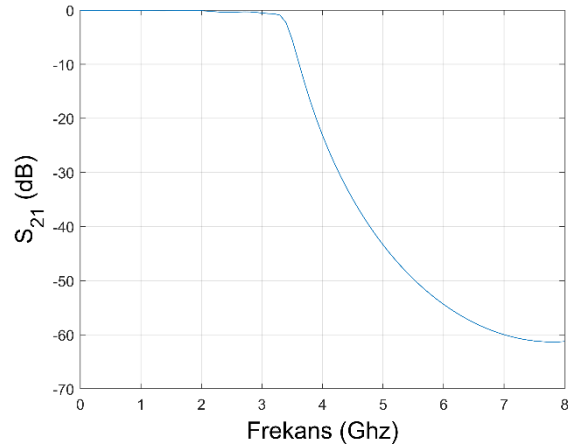


(b)

Şekil 12. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun diferansiyel evrim algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 60) (Using the differential evolution algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 60))

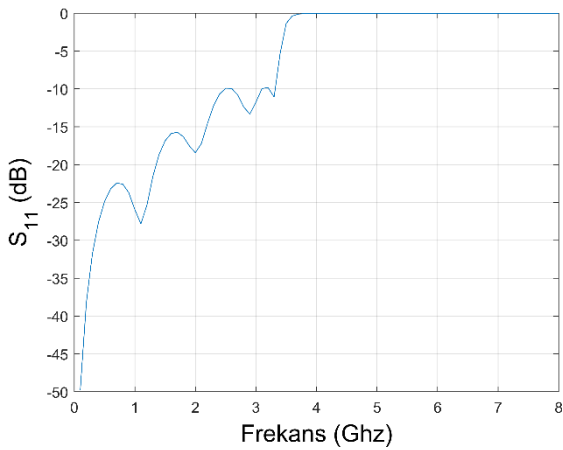


(a)

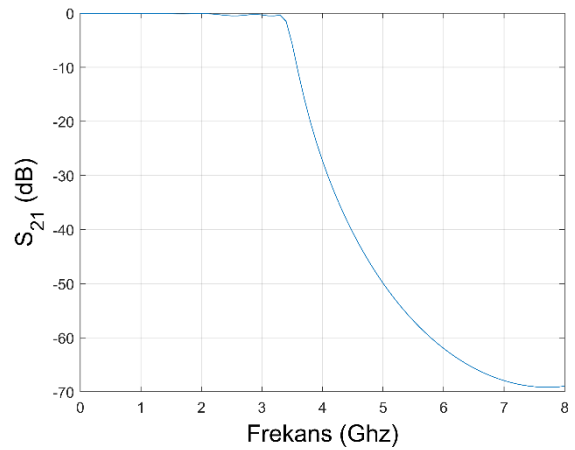


(b)

Şekil 13. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun diferansiyel evrim algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 80) (Using the differential evolution algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 80))

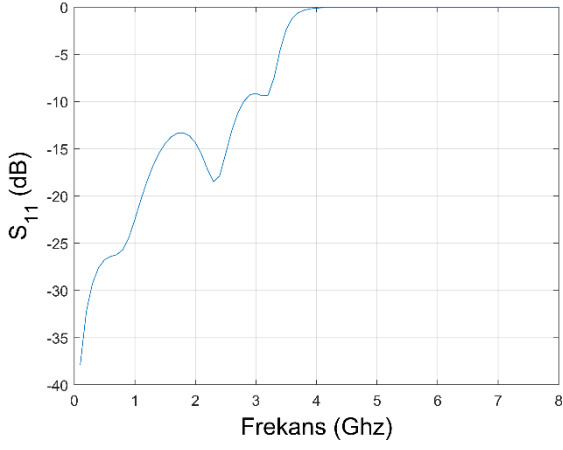


(a)

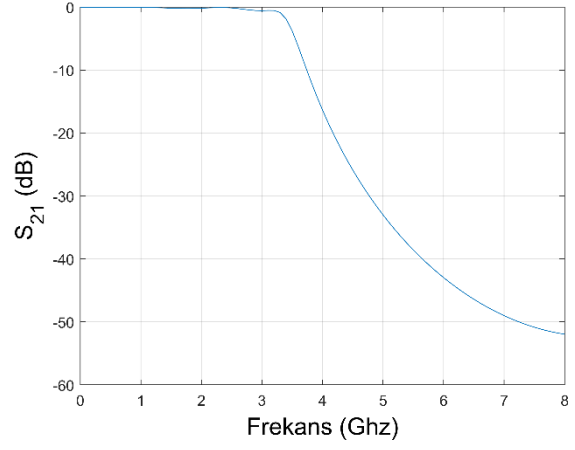


(b)

Şekil 14. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun diferansiyel evrim algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 100) (Using the differential evolution algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 100))

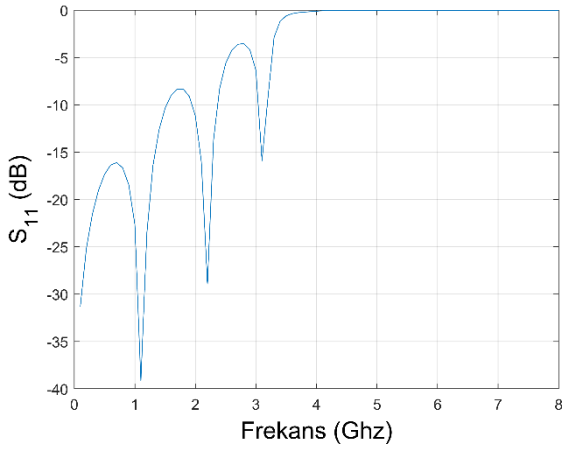


(a)

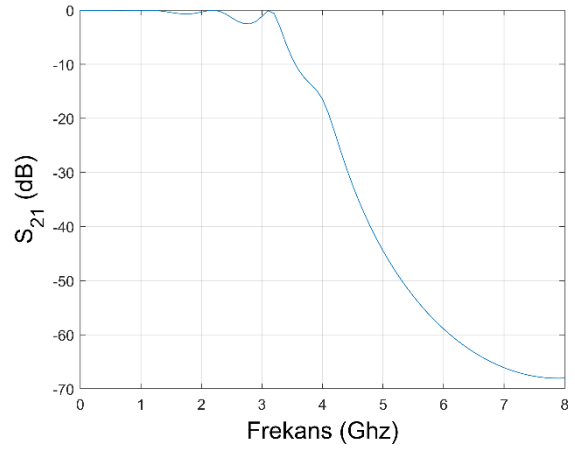


(b)

Şekil 15. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun guguk kuşu arama algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 60) (Using the cuckoo search algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 60))

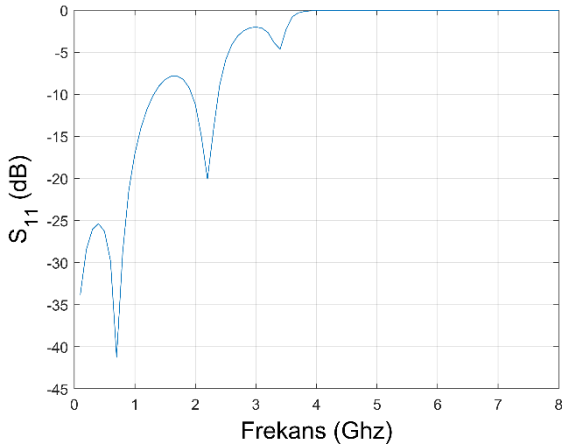


(a)

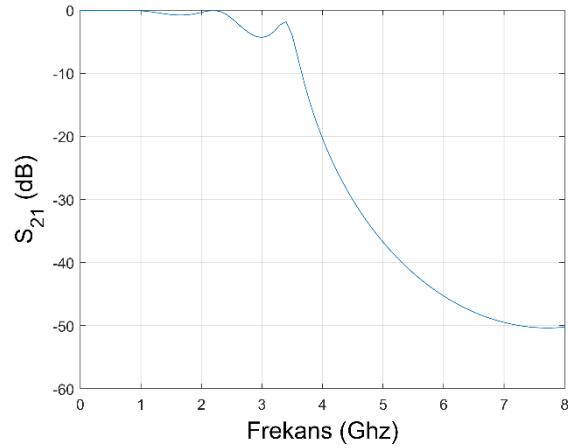


(b)

Şekil 16. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun guguk kuşu arama algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 80) (Using the cuckoo search algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 80))



(a)

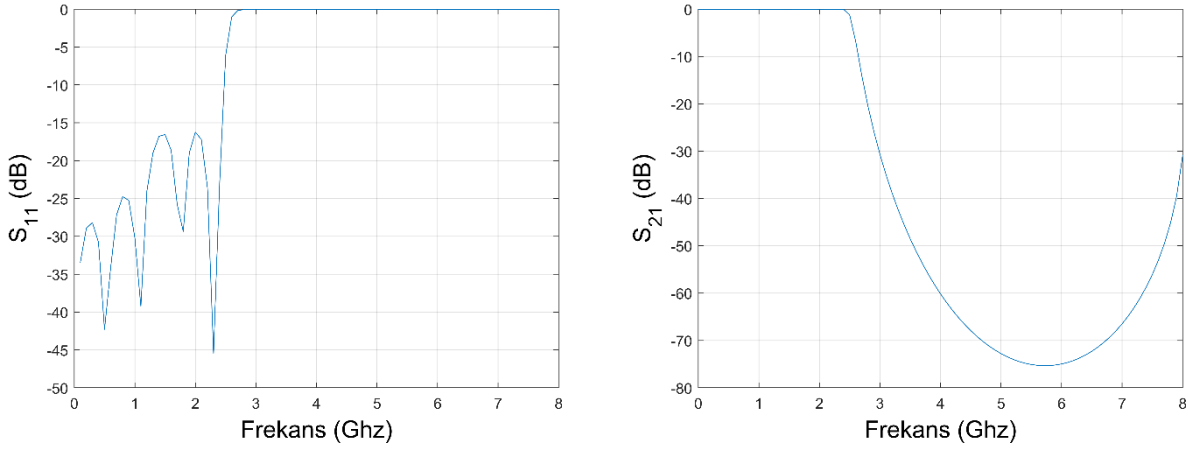


(b)

Şekil 17. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun guguk kuşu arama algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 100) (Using the cuckoo search algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 100))

4.3. En Başarılı Algoritma için Farklı Kesim Frekansında S Parametrelerinin Simülasyonu (Simulation of S Parameters at Different Cutoff Frequency for the Most Successful Algorithm)

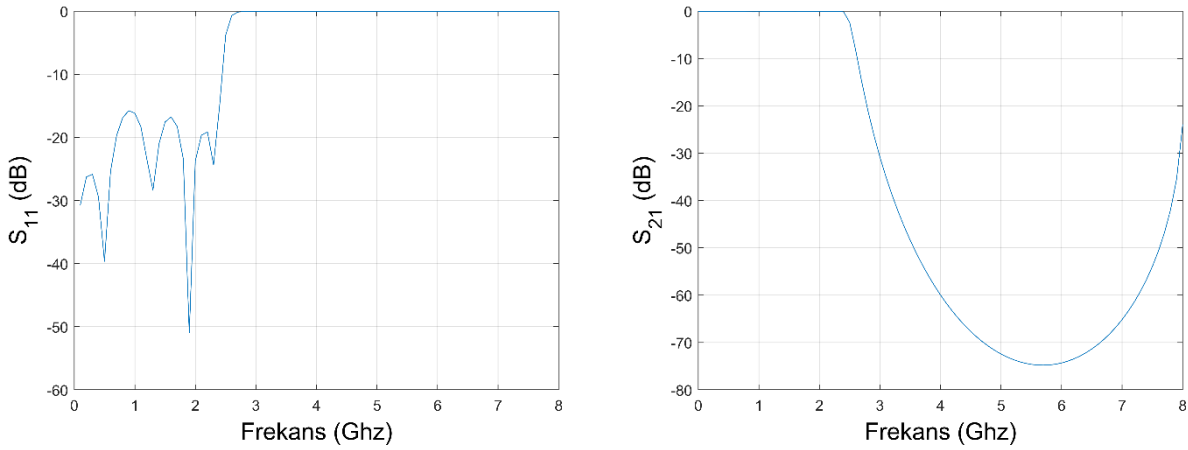
Çalışmanın bu kısmında bir önceki kısımlardaki çalışmalarda en başarılı sonuçlara sahip olan diferansiyel evrim algoritması kullanılarak 2,5 GHz kesim frekansına sahip filtre için optimizasyon yapılacaktır. Popülasyon (N) = 60, 80 ve 100 değerleri için en iyi performansa sahip sonuçları S_{11} ve S_{21} (dB) değerleri Şekil 18, Şekil 19 ve Şekil 20’de sırası ile gösterilmiştir. Grafiklere göz atıldığında en başarılı sonucun popülasyon değeri 100 için olduğu görülmektedir. Ayrıca kesim frekansının değiştirilmesinin algoritmanın başarısını etkilemediği görülmüştür. Böylelikle herhangi bir kesim frekansı için güvenli bir biçimde optimizasyon çalışmasının yapılabileceği görülmüştür.



(a)

(b)

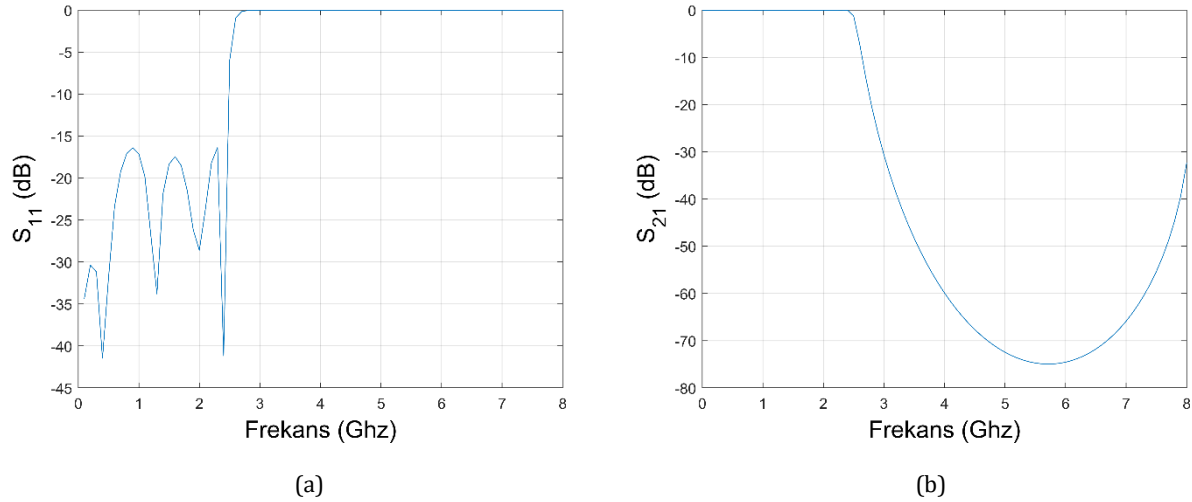
Şekil 18. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun diferansiyel evrim algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 60) (Using the differential evolution algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 60))



(a)

(b)

Şekil 19. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun diferansiyel evrim algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 80) (Using the differential evolution algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 80))



Şekil 20. Alçak geçiren filtrenin optimizasyonunun diferansiyel evrim algoritması kullanılarak: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simülasyonu (popülasyon (N) = 100) (Using the differential evolution algorithm of the low-pass filter optimization: (a) S_{11} (dB) (b) S_{21} (dB) simulation (population (N) = 100))

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, S-Bant kablosuz veya iletişim sistemlerinde kullanılacak alçak geçiren filtrenin tasarım sorunu, evrimsel algoritmalar ile bir optimizasyon problemi olarak formüle edilmiş ve mikroşerit filtrenin eleman sayısı, simetrik durumu ve elektriksel uzunluklarına yani dolayısı ile hatların boyutlarına göre çözümler maliyet fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Kademeli empedanslı alçak geçiren mikroşerit filtreler MATLAB programı ile simüle edildi. Tüm optimizasyon algoritmaları sonucu elde edilen kesme frekansı %55 oranında hedeflenen (3,5 GHz) değere yakındır. Ayrıca ateşböceği algoritması için bulunan tüm sonuçlar bu hedefte başarılı olmuştur. Elde edilen sonuçlarından da görülebileceği gibi, önerilen dört evrimsel tasarım optimizasyon yöntemi, geometrik tasarım parametreleri ve performans kriterleri açısından bir filtrenin optimal çözümlerini oluşturmak için efekt algoritmalarıdır. Tüm çalışmalar içerisinde en başarılı sonuca sahip olan diferansiyel evrim algoritması ile farklı kesim frekansı için ekstra bir çalışma yapılarak problemin farklı frekanslarda da uyarlanabilir olduğu gösterildi. Tek tek yapılan çalışmalara karşın bu en başarılı dört algoritmanın tek bir yazıda karşılaştırılması literatüre büyük katkı sağlamaktadır. Ek olarak farklı filtre tipleri için bundan sonra yapılacak olan optimizasyon çalışmalarının öncüsü niteliğindedir. Ayrıca planlanan filtre modelleme çalışması için bir temel oluşturmaktadır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Belen, M. A., Alici, M., Çor, A., Güneş, F., 2014. Performance Characterization of a Microwave Transistor Using Firefly Algorithm. Symposium of electrical- electronics and computer engineering ELECO, 27(29), 491-493.
- Das, S., Abraham, A. Chacraborty, U.K., Konar, A., 2009. Differential evolution using a neighborhood-based mutation operator. IEEE Transactions on evolutionary computation, 13(3), 526-553.
- Das, S., Suganthan, P.N., 2011. Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 15(1), 4-31.
- Güneş F., Belen M. A., Mahouti P., 2017. Competitive Evolutionary Algorithms for Building Performance Database of a Microwave Transistor. Int. J. Circuit Theory Appl., 46(2), 244-258, doi: 10.1002/cta.2386.
- Güneş F., Demirel S., Mahouti P., 2014. Design of a Front-End Amplifier for the Maximum Power Delivery and Required Noise by HBMO with Support Vector Microstrip Model. Radioengineering, 23(1).
- Güneş F., Demirel S., Mahouti P., 2015. A Simple and Efficient Honey Bee Mating Optimization Approach to Performance Characterization of a Microwave Transistor for the Maximum Power Delivery and Required Noise. Int. J. Numer. Model., doi: 10.1002/jnm.2041.
- Güneş, F., Karataev, T., Demirel, S., 2016. Composite right/left-handed transmission lines in use for ultrawideband matching of front-end amplifiers with modified cuckoo search optimization. International Journal of Numerical Modelling: Electronic networks, devices and Fields, DOI: 10.1002/jnm.21441.
- JiaShen Hong G., Lancaster M.J., 2001. Microstrip Filters for RF/ Microwave Applications. John Wiley & Sons Inc.

- Kale, S. S., Jadhav, A. N., 2013. An Empirically Based Path Loss Models for LTE Advanced Network and Modeling for 4G Wireless Systems at 2.4 GHz, 2.6 GHz and 3.5 GHz. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*, 2(9), 252-257.
- Liu, K., Frye, R., Emigh, R., 2009. Compact Balanced Band Pass Filter for 3.3GHz-3.9GHz WiMAX Applications, *Proc. IEEE Electronics Components and Technology Conf.*, 1599-1605.
- Mahouti, T., Yıldırım, T., Kuşkonmaz, N., 2021. Artificial intelligence-based design optimization of nonuniform microstrip line band pass filter, *International Journal of Numerical Modelling*.
- Pozar D.M., 2000. *Microwave Engineering*. John Wiley.
- Storn R., Price K., 1997. Differential Evolution—A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, Springer US, 341-359.
- Storn, R., Price, K., 1997. Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4), 341-359.
- Wang, F., He, X. S., Wang, Y., Yang, S., 2012. Markov model and convergence analysis based on cuckoo search algorithm. *Jisuanji Gongcheng/ Computer Engineering*, 38(11), 180-185.
- Wells J., 2009. MM-Waves in the Living Room: The Future of Wireless High Definition Multimedia. *Microwave Journal*, 62(8), 72-84.
- Yang, X. S, Deb, S., 2009. Cuckoo Search via Levy Flights. *Proc. of world congress on nature & biologically inspired computing*, 210-214.
- Yang, X. S., Deb, S., 2010. Engineering Optimization by Cuckoo Search. *Int. J. Mathematical modelling and numerical optimization*, 1(4), 330-343.
- Yang, X.S., 2009. Firefly Algorithms for Multimodal Optimization. *Stochastic Algorithms: Foundations and applications, SAGA, Lecture notes in computer sciences*, 5792, 169-178.
- Yang, X-S., (2013). Multiobjective Firefly Algorithm for Continuous Optimization, *Engineering with Computers. Engineering with Computers*, 29(2), 175-184.
- Yıldırım A., Güneş F., Belen M. A., 2017. Differential Evolution Optimization applied to the Performance Analysis Of a Microwave Transistor. *Sigma J Eng & Nat Sci* 8(2), 135-144.
- Yıldırım A., Mahouti P., Güneş F., 2016. Diferansiyel Evrim Algoritması Kullanılarak Mikrodalga Transistör Performans Analizi. *Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları (ASYU) Sempozyumu, 29Eylül-1 Ekim 2016 Düzce, Türkiye*
- Yıldırım, A., Moule, M. R., Yıldırım, T., 2017. Design Optimization of Ultra-Wide Band Microstrip Filter with Differential Evolution Algorithm. *Mugla Journal of Science and Technology*, 3(1), 69-72.
- Zhang, Q., Li, H., 2007. MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 11(6), 712-731.



HAZIR YEMEK SEKTÖRÜNDE BAZI TEMEL GİRDİLERİN TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİ, İZLENEBİLİRLİĞİ VE MEVZUATLA İLİŞKİ KURULARAK SİSTEM GELİŞTİRİLMESİ

Begüm KELEŞ*, Gülden OVA

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Tedarik Zinciri Yönetimi,
Bilgi Teknolojileri,
Gıda İzlenebilirliği,
Hazır Yemek Sektörü.*

Öz

Bu çalışmada, hazır yemek sektöründe faaliyet gösteren bir firmada, ilgili mevzuatlarda yer alan kalite kriterleri esas alınarak tedarik zincirinde hammaddelerin tedariklerinden son ürünün müşteriye teslim edilmesine kadar olan süreçte izlenebilirliğin sağlanması amacıyla bir uygulama geliştirilmiştir. "Gıda Takip Sistemi" olarak adlandırılan uygulamanın geliştirilmesinde C# (C Sharp) programlama dilinden ve MVC (Modal-View-Controller) mimarisinden yararlanılmıştır. Metro Framework, arayüz tasarımında kullanılmıştır. Uygulama, mühendis ve aşçının kullanımı için tasarlanmıştır. Gıda Takip Sistemi'nde ana kontrolör olan mühendis girişi yapıldığında; tanım, sipariş, tedarikçi siparişi, yemek ve stok görüntüleme ekranları açılmaktadır. Tanım ekranları; genel, malzeme ve menü alt sekmelerinden oluşmaktadır. Öncelikle, tüm tanımlamalar mühendis tarafından yapılmalıdır. Her bir girdiye ait mevzuattan alınmış kalite kriterlerine ilişkin değerler malzeme tanımları içerisinde yer almaktadır. Müşterilerden alınan siparişler, sipariş ekranı üzerinden girilmekte; tedarikçilere verilen siparişlerde ise tedarikçi siparişi sekmesi kullanılmaktadır. Gıda Takip Sistemi'nde aşçılar sadece stok görüntüleme ve yemek ekranına erişebilmektedir. Stok görüntüleme ekranında veri girişi yapılmamakta, sadece yapılan işlemler sonucu malzemelerin stok girişi ve çıkışı hareketleri gözlenmektedir. Yemek ekranında, sipariş ekranından yansımakta olan veriler ve reçete bilgileri iş akışının iyileştirilmesi konusunda aşçıya yol göstermekte, girdilerin stoktan kontrollü bir şekilde alınmasına olanak vermektedir. Gıda Takip Sistemi; sektörde tedarik zincirinin şeffaflaştırılarak yapılan işlemlerin optimize edilmesi ve gıda güvenliğinin sağlanması için atılmış bir adımdır.

SUPPLY CHAIN MANAGEMENT OF SOME BASIC INPUTS IN CATERING INDUSTRY, DEVELOP A SYSTEM ASSOCIATE WITH LEGISLATION TO PROVIDE TRACEABILITY

Keywords

*Supply Chain Management,
Information Technologies,
Food Traceability,
Catering Industry.*

Abstract

In this work; an application has been developed in a company operating in the catering sector, based on the quality criteria in the relevant legislation, in order to ensure traceability in the supply chain from the supply of raw materials to the delivery of the final product to the customer. C# (C Sharp) programming language and MVC (Modal-View-Controller) architecture were used in the development of the application called "Food Tracking System". Metro Framework has been used in the design of the interface. The application is designed for use by engineers and chefs. When the engineer logs in as a main controller of Food Tracking System; definition, order, supplier order, food and stock screens are displayed. Definition screens divided into three sections as general, material and menu. First of all, all definitions should be made by the engineer. The values related to the quality criteria taken from the legislation for each input are included in the material definitions. Orders received from customers are entered on the order screen. The supplier order tab is used for orders placed with suppliers. The chef can only access the food and stock display screens. Data entry doesn't made on the stock display screen, only the stock input and output movements of the materials as a result of the transactions are

* İlgili yazar/Corresponding author: begum_keles@hotmail.com, +90-232-388-23-95

observed. On the food screen, the data reflected from the order screen and the recipe information guide the chef to improve the workflow and allow the inputs to be taken from the stock in a controlled manner. Food Tracking System is a step taken to optimize the processes carried out by making the supply chain transparent in the sector and to ensure food safety.

Alıntı / Cite

Keleş, B., Ova, G., (2022). Hazır Yemek Sektöründe Bazı Temel Girdilerin Tedarik Zinciri Yönetimi, İzlenebilirliği ve Mevzuatla İlişki Kurularak Sistem Geliştirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 217-227.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

B. Keleş, 0000-0001-7776-7654

G. Ova, 0000-0002-9161-0212

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date

15.07.2021

Kabul Tarihi / Accepted Date

30.11.2021

Yayın Tarihi / Published Date

23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Tedarik zinciri; tüketici için ürün ve hizmet şeklinde değer üretmek amacıyla iş ortakları olarak birlikte çalışan paydaşlardan oluşan organizasyon ağı ve ilişkili faaliyetler bütünüdür (Zhang ve Li, 2012). Gıda tedarik zinciri ise kaliteli ve güvenli hammadde temininden başlayarak son ürünün tüketiciye ulaşmasına kadar devam eden süreçte gerçekleşen bütün işlemleri kapsar (Mahalik ve Kim, 2016). Tedarik zinciri yönetimi, tedarik zinciri boyunca ürün, hizmet ve bilgi akışının sürekli olarak sağlanması olup paydaşlar arasında eş zamanlı veri akışını zorunlu kılan bir yaklaşımdır. İzlenebilirlik ise bir ürünün tedarik zinciri içindeki hareketi ve yerini izleme yeteneğidir (Knight,2012). Günümüz koşullarında, ancak bilgi teknolojileri kullanımıyla etkinleştirilebilecek tedarik zinciri yönetimi ve izlenebilirlik, kritik yetkinlikleri temsil etmektedir (Zhang ve Li, 2012).

Gıda tedarik zinciri yönetiminin temel hedefi, gıda güvenliğini ve gıda kalitesini sağlamak olup uygunsuz gıda ürünlerinin hızlı bir şekilde tespiti ve geri çağırılması yoluyla insan sağlığının korunmasını esas alır (Mahalik ve Kim, 2016). Farklı bir açıdan, mevzuatımızda gıda sektöründe faaliyet gösteren firmalara izlenebilirliğin sağlanabileceği bir sistem kurma zorunluluğu getirilmiştir (Anonim, 2010). Gıda ürününün tedarik zinciri boyunca hareketlerine ilişkin kayıtlı verilere erişim olanağı; herhangi bir problem çıktığında sorunun kaynağını saptama konusunda üreticiye yol gösterirken, yasal sorumluluğunu yerine getirmesini sağlar. Satın aldığı gıda ürününün geçmişine ilişkin bilgilere ulaşan tüketicinin memnuniyetini artırır.

Gıda tedarik zinciri yönetiminde kullanılan veya gelişmekte olan bilgi teknolojileri; elektronik veri değişimi (Electronic Data Interchange-EDI), kurumsal kaynak planlaması (Enterprise Resource Planning-ERP), radyo frekanslı tanımlama (Radio Frequency Identification-RFID), nesnelere interneti (Internet of Things-IOT) ve blokzincir uygulamaları olarak sıralanabilir. Ayrıca, firma talebine göre şekillendirilebilen stok yönetimi, satın alma vb. gibi ihtiyaçlar için ticari yazılım paketleri bulunmaktadır (Keleş ve Ova, 2020). Fakat, özellikle küçük ve orta ölçekli firmalar başta maliyet faktörü olmak üzere alt yapı, teknik etmenler, eğitilmiş personel yetersizliği gibi gerekçelerle bilgi teknolojilerine yapacakları yatırımlardan verim alamayacaklarını düşünmektedir. Bu sebeplerle, basit iletişim araçlarıyla tedarik zincirini yönetmekte ve dokümantasyon aracılığıyla izlenebilirliği sağlamaya çalışmaktadırlar (Parseker, 2009; Sıki, 2011; Fidan, 2018).

İşyerleri veya okullarda geçirilen zamanın artmasından dolayı yemek yeme alışkanlıklarının değişmesi, yurt, hastane, huzurevi vb. yerlerde tabldot yemek ihtiyacının artması gibi sebeplerle hazır yemek sektörü rağbet görmektedir. Hazır yemek sektöründe hammadde ve ürün çeşidinin fazla olması dolayısıyla birlikte çalışılan tedarikçi sayısı artmakta ve kaynak kontrolü güçleşmektedir. Yemeklere göre değişkenlik gösteren reçeteler ve farklı gıda güvenliği risklerini barındıran çeşitli girdiler tedarik zincirini karmaşıktırmaktadır. Farklı bir açıdan, üretilen yemeklerin kısa süre içinde tüketilmesi gerektiğinden ve yemek faaliyeti toplu bir şekilde gerçekleştirildiğinden gıda güvenliği riski artmaktadır (Ma and Tung- Lap, 2017). Bütün bu sebeplerle, hazır yemek sektöründe faaliyet gösteren firmaların altyapı, eğitim ve maliyet masrafı olmaksızın kolaylıkla kullanabileceği, gıda girdilerinin tedarik edilmesinden son ürünün müşteriye teslim edilmesine kadar olan süreçte izlenebilirliği sağlayabileceği ve gıda girdilerinin kalite kriterlerini kontrol edebileceği bir uygulama olarak "Gıda Takip Sistemi" geliştirilmiştir. Sektörde faaliyet göstermekte olan firmaların büyük bir çoğunluğunun bilgi teknolojilerine ve izlenebilirlik kavramına uzak olması sebebiyle Gıda Takip Sistemi'nin bir yenilik olarak sektörde var olan problemlere çözüm oluşturması ve farkındalık yaratması amaçlanmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Hazır yemek sektöründe, hammadde tedariklerinden yemek sunumuna kadar her aşamada gıda güvenliği riski yüksektir. Bu sektörde faaliyet gösteren firmalarda ortaya çıkan gıda zehirlenmelerinin temel sebepleri; kalitesiz hammadde kullanımı, yetersiz muhafaza koşulları, hazırlık ve pişirme aşamalarında yanlış ısı uygulamaları, üretim

ve nakliye arasındaki uzun zaman aralığı, çapraz kontaminasyon, enfekte personel, hijyen ve sanitasyon uygulamalarının yetersizliği olarak belirtilmiştir (Sezgin ve Özkaya, 2014). Hazır yemek firmalarının temel sorunları ise; modern tesis kurulamaması, kayıt dışı üretim, haksız rekabet ve rekabet dolayısıyla kar marjı düşük olduğundan yatırım yapılmaması, denetimlerin yetersiz olması, nitelikli personel çalıştırılmaması, üretimde standardizasyon sağlanamaması, iş organizasyonlarının etkinleştirilememesinden kaynaklı tam kapasite çalışmaması ve gıda güvenliği yetersizliği olarak sıralanabilir (Kaya ve İlhan,2018; Şen,2020). Günümüzde, tüketiciler satın aldıkları gıda ürünleri için maliyetin ötesinde ürünün sağlıklı ve güvenilir olup olmadığını sorgulamaktadır. Dolayısıyla; sektörde faaliyet gösteren firmaların açıklanan sorunları giderebilmek ve modern tüketicilerin ihtiyaçlarını karşılayabilmek için kendi iş süreçlerinden, tedarik zincirinden ve tedarikçilerinden doğru bilgi almaları gerekmektedir. Bu kontrolün sağlanması ise tedarik zinciri yönetiminde kullanılacak izlenebilirlik sistemleriyle mümkündür (Ratcliff and Boddington, 2009).

Hazır yemek sektöründe başarılı olabilecek bir tedarik zinciri yönetiminde firma içinde gerçekleşen tüm faaliyetler (tedarik, depolama, hazırlık, üretim, nakliye vb.) birlikte yönetilmelidir. Farahani vd. (2009) tarafından yapılan bir çalışmada kalite odaklı üretim ve dağıtım kararlarının entegrasyonu ile hazır yemek firması tarafından müşterilere teslim edilen gıdaların kalitesinde artış gözlemlendiği belirtilmiştir.

Hazır yemek hizmeti sunan birtakım otel ve firmalarda bilgi teknolojileri kullanımına dair örnekler mevcuttur. Kocaeli mevkiinde yer alan beş yıldızlı bir otelin yiyecek-içecek bölümünde kullanılan bilişim teknolojisinin irdelendiği bir çalışmada, mutfakta bulunan gıda ürünlerin her biri için miktar, cins ve fiyat bilgisi girilerek satın alma ve stok tedariği arasında denge kurulduğu belirtilmiştir (Karaca ve Nergiz, 2019). Turkish Do&Co firması tarafından kurum içi iletişim yazılımı olarak kullanılan Rota isimli program Tatlıhoğlu (2010) tarafından incelenmiştir. Zincirin başlangıç noktası, tedarikçilerin hammaddeleri firmaya ait dokuz farklı üretim mutfağına teslim etmesi olup; bitiş noktası hazır yemeklerin uçaklara ulaştırılmasıdır. Programın, gıda ürünlerinin satın alınması ve muhafaza edilmesi süreçlerinde aktif olarak kullanıldığı ve tedarik zincirinde takibi kolaylaştırdığı bildirilmiştir.

Gıda ürünlerinde izlenebilirliğin sağlanması amacıyla yapılan akademik çalışmalarda farklı sektörler için bilgisayar sistemleri geliştirilmiştir. Oral (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, meyve-sebze sektöründe izlenebilirliğin sağlanması amacıyla TAMSİS isimli bir yazılım geliştirilmiştir. Sistem; tedarik zincirinde yer alan zirai ilaç bayi, komisyoncu, toptancı, süpermarket ve gıda denetimlerini gerçekleştiren kamu kurumlarının yazılıma entegre bir şekilde düzenli veri girişi yapması ile çalışmaktadır. Gölge ve Türk (2019) tarafından yapılan bir çalışmada ise, hazır pasta ve tatlı sektöründe faaliyet göstermekte olan firmalarda kullanılmak üzere coğrafi bilgi izleme (Geographical Information System- GIS) tabanlı bir izlenebilirlik sistemi geliştirilmiştir. Sistem, her bir ürünün üretim ve son tüketim tarihi baz alınarak tasarlanmıştır. Tarih bilgileri, araç takip ve navigasyon verileri sisteme işlenerek üretim aşamasından ürünün tüketiciye ulaşmasına kadar olan süreçte gerçek zamanlı izlenebilirlik hedeflenmiştir. Geliştirilen uygulama, lojistik süreci uzun ve yüksek bozulma riski olan ürünler için başarılı bir süreç yönetimi olarak değerlendirilebilir.

Gıda endüstrisinin farklı kollarında etkin tedarik zinciri yönetimi yaklaşımıyla uygulanan izlenebilirlik sistemlerinin yararlı olduğu yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır. Fakat, hazır yemek sektörünü geliştirmek için yapılmış olan çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmada, sektörde karşılaşılan sorunların çözümünde bir araç olarak firmalara ve tüketicilere çift taraflı fayda sağlayabilecek bir sistem geliştirilmesi amaçlanmıştır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Materyal (Material)

Hazır yemek sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın tedarik zincirinde hammadde temininden son ürünün müşteriye ulaşmasına kadar olan süreçte izlenebilirliği sağlamak amacıyla "Gıda Takip Sistemi" adı verilen bir uygulama geliştirilmiştir.

Gıda Takip Sistemi'nin işleyişini kurgulamak amacıyla Karabağlar/İzmir'de faaliyet gösteren Anadolu Yemeği ile görüşmeler yapılmıştır. Firmada çalışmakta olan mühendis ile yapılan görüşmelerde, uygulamanın çalıştırılması noktasında ihtiyaç duyulan taban veriler bir araya getirilmiştir. Elde edilen veriler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Hammadde olarak satın alınan gıda ürünlerinin ilgili mevzuatlardaki kalite kriterlerini vurgulamak amacıyla et, tavuk, bakliyat ve sebzenin ana yemek olduğu 4 farklı menü hazırlanmıştır. Menüler; çorba, ana yemek ve yardımcı yemek olmak üzere 3 çeşitten oluşmaktadır. Menülerde yer alan çeşitlerin her biri için gerekli gıda girdileri belirlenmiştir.

- Hazırlanan menülerde yer alan yemek çeşitlerinin reçete bilgileri temin edilmiştir. Gıda Takip Sistemi'nin işleyişi gereği reçeteler hazırlanırken her bir yemek çeşidi için kullanılacak girdilerin tamamı kişi başı miktarlar belirlenerek hesaplanmıştır. Sistem, reçeteler oluşturulurken tanımlanan kişi başı miktarları baz alarak istenilen porsiyon için gerekli olan miktarları otomatik hesaplamaktadır.
- Hazırlanan menülerin 4 farklı müşteriye farklı tarih/saat aralıklarında teslim edileceği varsayımı yapılarak müşterilerden alınan siparişler iş planına dahil edilmiştir. Burada, sipariş edilen menülerin her biri için farklı sayılarda porsiyon talep edildiği kabul edilmiş olup, stok takibinin önemi vurgulanmak istenmiştir.
- Belirlenen gıda girdilerinin temin edildiği tedarikçilere ilişkin bilgiler listelenmiş olup, çalışılan tedarikçi sayısının fazla oluşundan kaynaklı bir karışıklık olmadan problem çıktığı belirlenen ürünün kaynağının uygulama aracılığıyla kolayca saptanabildiği gösterilmek istenmiştir.
- Firmada, gıda hammaddelerinin ve ürünlerinin muhafaza edildiği depo çeşitleri ve sıcaklıkları bilgisi temin edilmiştir. Uygulamada, stok takibinin yapıldığı ekranda depo seçildiği takdirde içindeki gıda malzemeleri giriş ve çıkış hareketleri görülebilmektedir.
- Firmada, yemeklerin pişirilmesi aşamasında kullanılan ekipmanlar ve seçim kriteri bilgisi alınmıştır. Hazırlanacak yemeğin kişi sayısına göre kazanlarda çap seçimi yapılarak belirlendiği bildirilmiştir, kazanlar numaralandırılmıştır. Uygulamada, yemeklerin pişirilmesinde kullanılan kazan bilgisine ulaşılabilir.
- Gıda Takip Sistemi'nde kullanıcı oluşturulması için firmada çalışan mühendis ve aşçıların bilgileri alınmıştır. Uygulamada, yapılan her bir işlemin hangi personel tarafından yapıldığı görülmektedir.

Yapılan görüşmelerde, Anadolu Yemeği'nde en çok karşılaşılan sorunlar aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

- Birincil sorun, zaman kayıpları olarak gösterilmiştir. Zaman kayıpları;
 - Yemeklerin hazırlık veya pişme sürelerinden kaynaklanan zaman kayıpları, (üretim yemek reçetelerinde belirlenen işlem sırasına ve süresine uygun bir şekilde yapılamaması, işlem sürelerinin kayıt altına alınamaması sonucu hangi aşamada meydana geldiği belirsiz olan zaman kayıpları)
 - Planlanan saatte siparişlerin hazır olmaması,
 - Siparişlerin taşınması sırasında çıkabilecek aksiliklerden dolayı siparişin vaktinde teslim edilememesi olarak açıklanabilir.
- İkincil sorun, yemeklerde standardın sağlanamaması olarak belirtilmiştir.
 - Tuzlu, tuzsuz, yanık vb. şekilde geri bildirim aldıklarını,
 - Yemeklerin tekrar pişirilmesi gereken durumlarda zaman ve maliyet kaybı ortaya çıktığı ifade edilmiştir.
- Üçüncül bir sorun olarak, tedarikçilerden kaynaklanan aksaklıklar gösterilmiştir. Bu sorunlar;
 - Siparişlerin geç getirilmesi,
 - Sipariş verilen gıda ürünlerinde talep edilen kalite kriterlerin sağlanamaması (uygunsuz ürün getirilmesi) sonucu iade ve sipariş tekrarından zaman kayıpları olarak sıralanmıştır.

3.2. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Gıda Takip Sistemi'nin işleyişinin kurgulanması noktasında hazırlanan menüler üzerinden belirlenen gıda girdilerine ait kalite kriterlerini saptamak amacıyla mevzuatta tarama yapılmıştır. Bir hazır yemek firmasında, gıda güvenliğini ve gıda kalitesini güvence altına almak amacıyla tedarikçilere ön koşul olarak bildirilmesi mutlaka gerekli kalite kriterleri ele alınmış olup Tablo 1'de belirtilmiştir. Tablo 1'de verilen kalite kriterleri Gıda Takip Sistemi'nde "Tanımlar" bölümünde "Malzeme Tanımları" sekmesinde yer alan özellik kısmına değerleri ile birlikte eklenecektir. Tedarikçilerin, temin ettikleri ürünlerde bu kalite kriterlerinin sağlanması beklenmektedir.

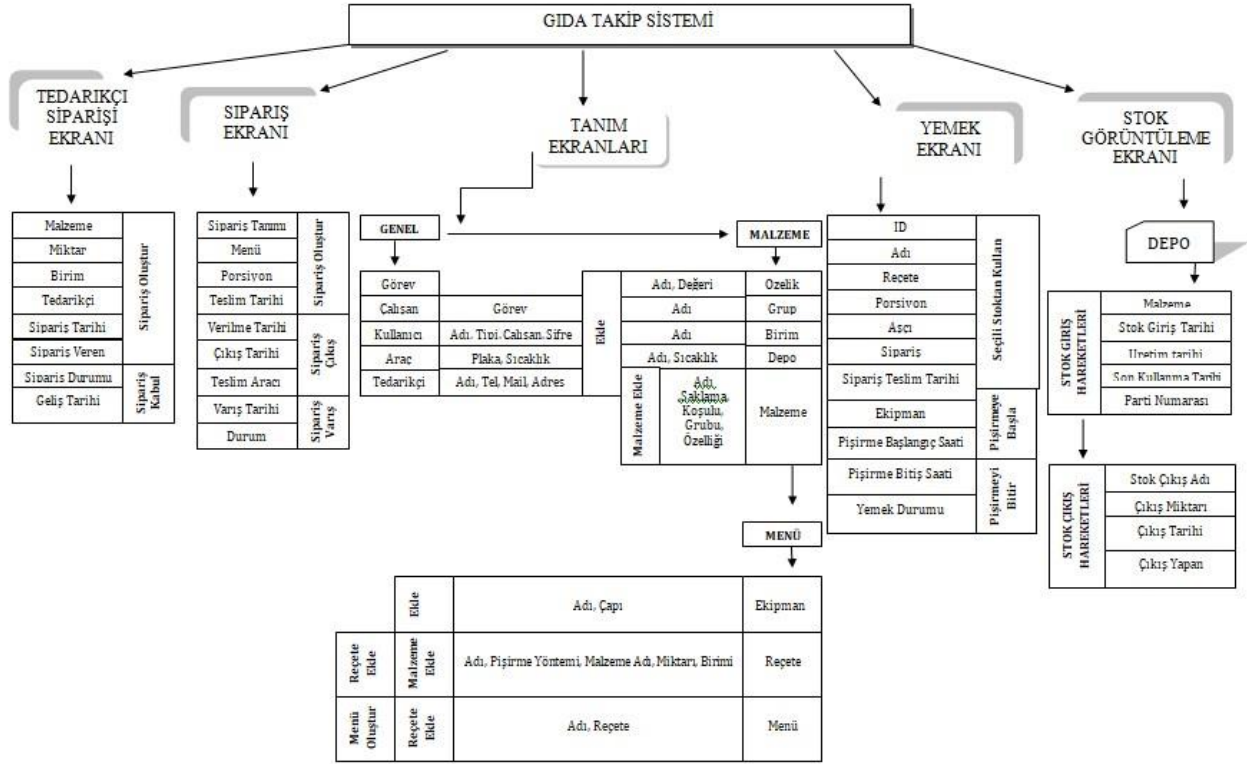
Tablo 1. Belirlenen girdilere ait mevzuattan alınmış kalite kriterleri (Quality criterias of the determined inputs taken from the legislation)

Girdi	Kalite kriteri	Değer Aralığı	Referans alınan mevzuat
Kırmızı et	Nem miktarı kütlece en çok	%45	Türk Gıda Kodeksi Et, Hazırlanmış Et Karışımları Ve Et Ürünleri Tebliği (Tebliğ No: 2018/52) Türk Gıda Kodeksi Mikrobiyolojik Kriterler Yönetmeliği (Tarih:29.12.2011, Sayı:28157)
	Yağ oranı kütlece en çok	% 30	
	Mikrobiyolojik (<i>Salmonella</i> için n:5 c:0 olmak üzere)	m ve M için: 0/25 g-ml	
	Mikrobiyolojik (<i>E. coli</i> O157 için n:5 c:0 olmak üzere)		
Tavuk	Mikrobiyolojik (<i>Salmonella</i> için n:5 c:0 olmak üzere)	m ve M için: 25 g-veya ml'de bulunmayacak	Türk Gıda Kodeksi Mikrobiyolojik Kriterler Yönetmeliği (Tarih:29.12.2011, Sayı:28157) Değişiklik: 09.10.2018 Sayı: 30560
	Mikrobiyolojik (<i>Typhimurium</i> için n:5 c:0 olmak üzere)		
	Mikrobiyolojik (<i>Enteritidis</i> için n:5 c:0 olmak üzere)		
Pirinç	Rutubet miktarı en fazla	%14,5	Pirinç 1. Sınıf kabul edilmiştir. Türk Gıda Kodeksi Pirinç Tebliği (Tebliğ No: 2010/60)
	İnorganik yabancı madde ağırlıkça en fazla	%0,05	
Bulgur	Rutubet, % (m/m), en çok	13	Türk Gıda Kodeksi Bulgur Tebliği (Tebliğ No: 2016/49)
	Toplam yabancı madde en çok % (m/m)	0,5	
Nohut	Rutubet muhtevası kütlece en çok	% 14	TS 143 Mercimek (Kabuklu Ve İç), TS 1131 Sarmisak, TS 1130 Ispanak, TS 1194 Yeşil Salata Ve Marul, TS 793 Kiraz Ve Vişne, TS 185 Çilek, TS 791 Kayısı, TS 1206 Sap Ve Kök Kereviz Ve TS 142 Nohut Standardinin Revizyonuna İlişkin Diş Ticarete Standardizasyon Tebliği Tebliğ no: (2008/37)
	Yabancı madde oranı kütlece en çok	% 0,5	
Mercimek	Rutubet % en çok	12	Kırmızı iç mercimek olarak kabul edilmiştir. Türk Gıda Kodeksi Mercimek Tebliği (Tebliğ No: 2003/25)
	Toplam yabancı madde % en çok	1	
Makarna ve Tel şehriye	Rutubet miktarı en fazla	%13	Türk Gıda Kodeksi Makarna Tebliği (Tebliğ No: 2002/ 20)
	Sade makarnada kül miktarı kuru maddede en çok	%1	
Donuk taze fasulye	Kesim sırasında iri fasulye içinden çıkan serbest tane miktarı	≤12	Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Gıda Malzemelerine Ait Teknik Şartname Ve Evsflar
Limon	Donmuş, küflü, ufak, buruşmuş limon adedi	0	
Kuru soğan	Kokmuş, yumuşamış, donmuş filizlenmiş kuru soğan adedi	0	
Margarin	Asit sayısı en çok	%1,5	
Ayçiçek yağı	Kırılma indisi 40 °C' de	1,461-1,471	Türk Gıda Kodeksi Bitki Adı İle Anılan Yağlar Tebliği (Tebliğ No: 2012/29)
	Asit sayısı en çok	0,6 mg KOH /g yağ	
Salça	Briks en az	%28	Domates salçası kabul edilmiştir. Türk Gıda Kodeksi Salça Ve Benzeri Ürünler Tebliği (Tebliğ No: 2020/19)
	%10'luk HCl'de çözünmeyen kül oranı (toplam kuru maddede)	≤%0,3'ten (m/m)	
	Tuz miktarı (toplam kuru maddede)	≤ %5	
Yoğurt	Süt yağı	≥ % 3,8	Tam yağlı yoğurt olarak kabul edilmiştir. Türk Gıda Kodeksi Fermente Süt Ürünleri Tebliği (Tebliğ No:2009/25)
	Titrasyon asitliği (Laktik asit olarak ağırlıkça %)	0,6-1,5	
Kuru şekerpare	Kırık parça oranı % (m/m) en çok	0,5	TS 13470 Şerbet eklenmeye hazır hamur tatlıları standardı
	Rutubet % (m/m), en çok	10	
	Asitlik (özütlenen yağda oleik asit cinsinden) (kuru maddede), % (m/m), en çok	2	
Un	Nem % (m/m) en çok	14,5	Özel amaçlı buğday unu olarak kabul edilmiştir. Türk Gıda Kodeksi Buğday Unu Tebliği (Tebliğ No:2013/9)
Yumurta	Çatlak ve kırık yumurta adedi	0	A sınıfı kabul edilmiştir. Türk Gıda Kodeksi Yumurta Tebliği (Tebliğ No:2014/55)
	Yabancı koku	İçermez	
Toz şeker	Polarizasyon	≥ 99,7 °Z	Beyaz şeker olarak kabul edilmiştir. Türk Gıda Kodeksi Şeker Tebliği (Tebliğ No: 2006/40)
	Kurutma kaybı (%m/m)	≤ 0,06	
Tuz	Rutubet miktarı kütlece en çok	% 0,5	Sofra tuzu olarak kabul edilmiştir. Türk Gıda Kodeksi Tuz Tebliği (Tebliğ No:2013/48)
	Kuru maddede sodyum klorür miktarı en az	%98	
	Suda çözünmeyen madde miktarı kütlece en çok	% 0,5	
Karabiber	Rutubet en çok (%)	12	Kekik ve nane hariç baharatlar öğütülmüş kabul edilmiştir. Türk Gıda Kodeksi Baharat Tebliği (Tebliğ No:2013/12)
	Toplam kül k.m. en çok (% m/m)	8	
	%10 luk HCl de çözünmeyen kül k.m. en çok (%m/m)	1	
Kimyon	Rutubet en çok (%)	10	
	Toplam kül k.m. en çok (% m/m)	9	
	%10 luk HCl de çözünmeyen kül k.m. en çok (%m/m)	1	
Kırmızıbiber	Rutubet en çok (%)	11	
	Toplam kül k.m. en çok (% m/m)	9	

	%10 luk HCl de çözünmeyen kül k.m. en çok (%m/m)	1	
Kekik	Rutubet en çok (%)	10	
	Toplam kül k.m. en çok (% m/m)	12	
	%10 luk HCl de çözünmeyen kül k.m. en çok (%m/m)	2	
Nane	Rutubet en çok (%)	10	
	Toplam kül k.m. en çok (% m/m)	12	
	%10 luk HCl de çözünmeyen kül k.m. en çok (%m/m)	2,5	
Su	pH	≤ 9,5-6,5≤	İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik Tarih: 17.02.2005 Sayı: 25730

Gıda Takip Sistemi, merkezi bir bilgisayarda kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Uygulamanın geliştirilmesinde C# (C Sharp) programlama dilinden ve MVC (Modal-View-Controller) mimarisinden yararlanılmıştır. Günümüzde popüler bir programlama dili olarak kullanılan C#, nesneye yönelimli programlama yapabilme olanağı sunduğu için bu dilde yazılım geliştirmek diğer seçeneklere göre daha kolaydır. MVC; programın yazılış şekli olup nesne görünüm ve işlemler burada yer almaktadır. Bu mimari sayesinde işlemler arayüz kodlarından ayrıldığı için kodların yönetilebilirliği artırılmaya çalışılmıştır. Uygulama masaüstü uygulaması olacak şekilde oluşturulmuştur ve .exe uzantılı dosya aracılığıyla çalıştırılmaktadır. Uygulama arayüzünde Metro Framework kullanılarak arayüz tasarımı bu kütüphane yardımıyla sağlanmıştır. Metro Framework, kullanıcı tasarımları için hazırlanmış bir tasarım kümesidir. Programın görünüşünü modernleştirmektedir.

Gıda Takip Sistemi'nde yer alan sekmeler ve işleyiş Şekil 1'deki gibidir. Uygulama, firma içi faaliyetlerden sorumlu mühendisin merkezi bilgisayarına yüklenecektir. Gıda Takip Sistemi, aşçı ve mühendis olmak üzere iki tip kullanıcı için hazırlanmıştır. Öncelikle, mühendis kullanıcı adı ve şifresiyle sisteme giriş yapmalı ve Bölüm 3.1'de açıklanan verileri sisteme tanımlamalıdır. Gıda Takip Sistemi'ne mühendis girişi yapıldığı takdirde beş sekme görüntülenmektedir. Bu sekmeler; Tanım, Sipariş Ekranı, Tedarikçi Siparişi, Yemek ve Stok Görüntüleme Ekranlarıdır. Tanım Ekranları; Genel, Malzeme ve Menü olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. Genel sekmesinde, hazır yemeklerin müşterilere taşınacağı araçlara ait araç içi sıcaklık ve plaka bilgileri girilmekte, birlikte çalışılan tedarikçiler iletişim bilgileriyle sisteme eklenmektedir. Malzeme sekmesinde, özellik olarak belirtilen kısımda, tedarikçilerden temin edilecek her bir gıda girdisi için talep edilen kalite kriterleri Tablo 1'de verildiği şekilde değerleriyle birlikte tanımlanmalıdır. Malzeme grubu sekmesi; et/tavuk, bakliyat, sebze, baharat vb. şeklinde gıdaların gruplandırılması için oluşturulmuştur. Birim; gıda girdilerinde kullanılan miktarı ifade etmek için kg, L, adet vb. tanımlanmaktadır. Firma içinde gıda ürünlerinin muhafaza edildiği depolar numaralandırılarak sıcaklık değerleriyle donuk depo (-18 °C), soğuk depo 1 (4°C) vb. şeklinde Depo kısmına eklenmektedir. Bu bölümdeki son tanımlama olan Malzeme kısmında, daha önce eklenmiş olan veriler kullanılmaktadır. Malzemenin; adı, saklama koşulu, grubu seçilmekte, özellikleri birer birer eklenmektedir. Özellikler tamamlandıktan sonra önceki bölümlerden farklı olarak Malzeme Ekle butonuyla Malzeme tanımlamaları bitirilmektedir. Tanım ekranlarının son bölümü olan Menü kısmında, öncelikle firmada yemeklerin pişirilmesinde kullanılan kazanlar çaplarına göre numaralandırılarak eklenmektedir. Yemek reçetelerinin oluşturulması için yemeğin adı ve pişirilme yöntemi yazılmakta, Malzeme Tanımları bölümünde tanımlanan malzemeler ilgili yemekte kişi başı kullanılması gereken sayısal değer ve birimleriyle birlikte birer birer eklenmektedir. İlgili yemeğe dair tüm malzemeler eklendiğinde Reçete Ekle butonuyla reçeteler oluşturulmaktadır. Menüler, isimlendirilerek ve tanımlanan reçeteler eklenerek Menü Oluştur butonuyla tamamlanmaktadır. Bu aşamada eklenen menüler, yemek çeşitleri ve kişi başı değerler Bölüm 3.1' de firmada görev yapmakta olan mühendis ile yapılan görüşmelerde bir araya getirilen verilerdir.



Şekil 1. Gıda Takip Sistemi'nde yer alan sekmeler ve işleyiş(Tabs and operations in Food Tracking System)

Firma, müşterilerden haftalık olarak sipariş almaktadır. Müşterilerden alınan siparişler, sipariş ekranı sekmesinden, sipariş tanımı (müşteri adı), talep edilen menü, porsiyon ve teslim edilmesi istenilen tarih ve saat aralığı şeklinde Sipariş Oluştur butonuyla sisteme kaydedilmektedir. Müşterilerden alınan siparişlere göre gerekli olacak gıda girdileri ve miktarları mühendis tarafından hesaplanmakta, tedarikçilere sipariş edilmektedir. Sipariş verildikten sonra, firma içi faaliyetten sorumlu Gıda Takip Sistemi'ne, temin edilmesi beklenen gıda girdileri malzeme adı, miktarı ve birimi, hangi tedarikçiden talep edildiği bilgisi girilerek Sipariş Oluştur butonuyla kaydedilmektedir. Bu bölümde, siparişi veren kısımda mühendis ve sipariş tarihi kısmında butona basıldığı tarih bilgisi yer almaktadır. Sipariş edilen gıda girdileri firmaya ulaştığında, Tedarikçi Siparişi sekmesinden gıda hammaddeleri ve ürünlerine ait üretim tarihi, son tüketim tarihi, parti numarası, muhafaza edileceği depo gibi alanlar doldurularak malzemelerin kabulü yapılmaktadır. Bu alanların doldurulduğu tarih ve kabul/red bilgisi otomatik olarak ilgili kısımda görüntülenmekte, durum bilgisi "Teslim Edildi" şeklinde güncellenmektedir. Yemeklerin pişirilmesi aşamasında, aşçı kendi kullanıcı adı ve şifresiyle sisteme giriş yapmaktadır. Aşçı kullanıcı tipiyle giriş yapıldığı takdirde Gıda Takip Sistemi'nde erişim sağlanan ekranlar Yemek ve Stok Görüntüleme Ekranlarıdır. Aşçı, müşterilerden alınan siparişleri; menü, porsiyon, teslim tarihi/saati, menü içindeki yemek çeşitlerini, bu çeşitlere ait reçete bilgilerini Yemek Ekranı sekmesinden görüntülemektedir. Hazırlayacağı yemek çeşitlerini, reçetelerde verilen pişirme sürelerine uygun bir şekilde sıraya koymaktadır. Pişirmeye başlayacağı yemek çeşidinin üzerine tıkladığında reçete bilgileri, ihtiyaç duyduğu malzemeler ve kişi başı miktarlarına ait verilerin olduğu bölüm açılmakta Seçili Stoktan Kullan butonuyla malzemeleri eklemektedir. Bu aşamada, hazırlayacağı porsiyon için gerekli miktar stokta mevcut değilse "Mevcut Malzeme Stoğu Bulunmamaktadır" şeklinde uyarı almakta, işleme devam edememektedir. Tüm girdilerin stokta yeterli miktarda yer aldığı bir senaryoda, hazırlanacak porsiyona göre çap bazında seçilen ekipman sonrasında Pişirmeye Başla butonu ile yemeğin durumu "Pişiyor" şeklinde güncellenmektedir. İlgili butonlara basıldığı ana ait zaman bilgisi pişirme başlangıç saati, bitiş saati gibi kısımlara otomatik işlenmektedir. Pişirmekte olan yemeğin üzerine tıkladığında bir bitiş saati sekmesi oluşmaktadır. Pişirmeyi Bitir butonuyla bitiş saati eklenmekte, yemeğin durumu "Tamamlandı" olarak güncellenmektedir. Müşteriye taşınmaya hazır durumdaki siparişin çıkış işlemi Sipariş Ekranından araç bilgisi seçilerek yapılmakta, bu aşamada durum bilgisi "Beklemede" olan sipariş "Yolda" şeklinde güncellenmektedir. Sipariş müşteriye teslim edildikten sonra, "Yolda" olan siparişin üzerine tıkladığında oluşacak sekmede teslim saati girildiği takdirde sipariş durumu "Teslim Edildi" olarak güncellenecektir. Stok Görüntüleme Ekranında veri girişi yapılmamaktadır. Bu ekranda, depo bilgisi seçildiği takdirde ilgili depo içinde yer alan gıda malzemelerinin firmaya kabulünün yapıldığı miktarlar ve malzeme bilgileri, yemeklerin pişirilmesi sırasında kullanılan miktarlar stok giriş ve çıkış hareketlerinden görülebilmekte, depolara malzeme girişlerini ve çıkışlarını yapmış olan kullanıcı ve tarih/saat bilgilerine ulaşılabilir. Gıda Takip Sistemi'nin kurgulanması sürecinde uygulamaya işlenen verilerin tamamı Bölüm 3.1'de belirtilmiştir.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Gıda Takip Sistemi, Anadolu Yemeği'nden temin edilen taban veriler kullanılarak kurgulanmıştır. Gıda Takip Sistemi'nde müşterilerden alınan sipariş talepleri itibarıyla tedarikçilere verilen sipariş tarihleri, siparişlerin firmaya kabulü ile malzemelerin stoğa giriş tarihleri, malzemelerin hangi siparişlerin hazırlanmasında kim tarafından stoktan çıkarıldığına dair miktar ve tarih bilgileri, yemeklerin pişirmeye başlanması ve bitirilmesi aşamalarına ait detaylı zaman aralıkları, siparişin firmadan çıkış saati, varış saati gibi tedarik zincirinde yer alan faaliyetlerde geçen süreler net bir şekilde görülebildiğinden olası zaman kayıplarının hangi aşamalarda ve kimin sorumluluğunda meydana geldiği belirlenebilmektedir. Bu çözüm, firma tarafından birincil sorun olarak ifade edilen zaman kayıplarına işaret etmektedir. Açıklar, Gıda Takip Sistemi'nin Yemek Ekranından hazırlamakta oldukları siparişe ilişkin reçete bilgilerinde yer alan pişirme sürelerine ve girdi gramajlarına uygun işlem yaptıklarından yemeklerde standardizasyonun sağlanması (yanık, çiğ, tuzlu, tuzsuz olması vb.) konusundaki sorunların aşılması kolaylaşmıştır. Yemek Ekranına ait bir görüntü Şekil 2'deki gibidir. Yemeklerde standardizasyon sağlandığı takdirde yeniden pişirme gibi ihtiyaçların azalacağı öngörülmektedir. Mühendis, Gıda Takip Sistemi üzerinden tedarikçilere verilen sipariş tarihleri ve malzeme kabul tarihlerine kolayca ulaşabildiğinden hammadde ve girdi çeşidinin fazla olmasından kaynaklı tedarikçi karmaşıklığından etkilenmeksizin tedarikçilerle ilgili istatistikler oluşturabilir duruma gelmiştir. Bu şekilde, geç veya uygunsuz malzeme getiren tedarikçiler belirlenerek, iş ortakları konusunda daha sağlıklı seçimler yapılabilir.

Yemek Ekranı

Yemek Listesi

ID	Adı	Reçete	Porsiyon	Sipariş Teslim Tarihi	Sipariş	Piçime Başlangıç Saati	Piçime Bitiş Saati	App	Ekipman	Yemek Durumu
138	136*119*117*28...	Fırın Tavuk	250	02.03.2021 12:30	M1 Koleji	02.03.2021 10:31	02.03.2021 11:30	Koray	Tepsi	Tamamlandı
139	136*119*118*28...	Makarna	250	02.03.2021 12:30	M1 Koleji	02.03.2021 10:40	02.03.2021 11:35	Koray	Kazan 2	Tamamlandı
141	140*123*120*28...	Mercimek Çorba	100	02.03.2021 17:00	M2 Öğrenci Yurdu	02.03.2021 15:20	02.03.2021 16:20	Ali	Kazan 1	Tamamlandı
142	140*123*121*28...	Nohut	100	02.03.2021 17:00	M2 Öğrenci Yurdu	02.03.2021 14:20	02.03.2021 16:20	Ali	Kazan 1A	Tamamlandı
143	140*123*122*28...	Bulgur Pilavı	100	02.03.2021 17:00	M2 Öğrenci Yurdu	02.03.2021 15:35	02.03.2021 16:05	Ali	Kazan 1B	Tamamlandı
145	144*127*124*28...	Tel Şehriye Çorba	500	03.03.2021 12:00	M3 Üniversite Yemekh...					Bekliyor
146	144*127*125*28...	Kavurma	500	03.03.2021 12:00	M3 Üniversite Yemekh...	03.03.2021 10:15		Koray	Kazan 2A	Piçiyor
147	144*127*126*28...	Pirinç Pilavı	500	03.03.2021 12:00	M3 Üniversite Yemekh...	03.03.2021 10:10		Koray	Kazan 2B	Piçiyor

Reçete Adı: Tel Şehriye Çorba

Piçirme Yöntemi:
100 kişi için 10 L su kaynatılır. 1 kg tel şehriye içersine atılarak 10 dk kaynatılır. Aynı bir tencerede 1,5 L yağ ve 2 kg un 10 dk kavrulur. 1,5 kg salça ilave edilerek kavrulur. Hazırlanan terbiye, 1 L su ile açılır. Açıldıktan sonra kaynatılmış tel şehriye içersine ilave edilir. 150 g tuz ve 20 g karabiber eklenir. Toplam süre 45 dakikadır.

Malzeme Listesi

Malzeme	Birim
Tel Şehriye	0,01 kg
Su	0,11 L
Ayçiçek yağı	0,015 L
Un	0,02 kg
Salça	0,015 kg
Tuz	0,0015 kg
Karabiber	0,0002 kg

Seçili Malzeme Mevcutları

Deposu	Üretim Tarihi	Son Kullanım Tarihi	Mevcut
Kuru depo	17.09.2020 00:00	17.09.2021 00:00	10 kg

Seçili Stoktan Kullan

Ekipman
Kazan 2

Şekil 2. Yemek Ekranına ait bir görüntü (A figure of Food Screen)

Hazır yemek sektöründe temel bir problem olarak karşımıza çıkan gıda güvenliği yetersizliği; hammadde, girdi, tedarikçi sayısının fazla ve üretim yöntemlerinin çok çeşitli olmasından dolayı karmaşıklaşan tedarik zincirinin etkin bir şekilde yönetilememesinden kaynaklanmaktadır. Farahani vd. (2009) tarafından yapılan çalışmanın bir sonucu olarak da belirtildiği üzere tedarik zincirinde gerçekleşen tüm faaliyet entegre bir şekilde değerlendirildiğinde hizmet kalitesi artmaktadır. Gıda Takip Sistemi'nde, gıda girdilerinin tedarikçiden temin edilmesinden son ürünün müşteriye ulaşmasına dek geçen süreçte tedarik, üretim, stok kontrol, dağıtım gibi süreçler ilişkili bir şekilde tasarlanmıştır. İzlenebilirlik sistemleri, kullanılacakları sektörde risk katsayısı yüksek işlemler odağında oluşturulmakta diğer işlemlerle çerçevelendirilmektedir. Örneğin, Oral (2009) tarafından yapılan çalışmada, meyve-sebze sektöründe izlenebilirliğin sağlanmasında bir araç olarak geliştirilen TAMSİS' in odak noktası zirai ilaç kalıntısı ve takibidir. Gölge ve Türk (2019) tarafından yapılan çalışmada, bozulma riski yüksek olan hazır tatlıların izlenebilirliğinin sağlanması amacıyla geliştirilen sistemde odak noktası lojistikdir. Üretim ve dağıtım yapılan alanlar arası mesafe uzun olduğundan gıda güvenliği risklerinin önüne geçebilmek için GIS tabanlı sistem tercih edilmiştir. Hazır yemek sektöründe faaliyet gösteren firmaların odak noktası ise üretim ve stok kontrolü olarak düşünülebilir. Hazır yemeklerin kısa sürede tüketilmesi gerektiğinden bu sektörde faaliyet gösteren firmalar genellikle yakın bölgelere hizmet vermektedir. Bu durum, lojistik kaynaklı riski düşürmektedir. Tedarikçilerden temin edilen gıda malzemeleri kalite kontrolden geçirildikten sonra teslim alındığından tedarikçilerden kaynaklı riskler erken safhada tespit edilebilmektedir. Hazır yemek sektöründe yaygın olarak karşılaşılan sorunlar daha çok üretim ve stok fazlası/yetersizliğinden meydana gelmektedir. Karaca ve Nergiz (2019) tarafından yapılan çalışmada, incelenen bilişim teknolojisinde de satın alma ve stok tedariki arasında kurulan denge, bu düşüncüyü destekler niteliktedir. Tatlıhoğlu (2010) tarafından incelenen bir diğer yazılımda da satın alma ve depolamanın ön planda olduğu görülmektedir. Gıda Takip Sistemi'nin geliştirilmesinde amaç, gıda

güvenliğini sağlamak ve gıda kalitesini korumak olup program üretim ve stok kontrolü konusunda daha detaylıdır. Bir diğer kilit nokta; her bir gıda girdisi için değerlendirilen spesifik kalite kriterleridir. Bu kriterler, mevzuatın sürekli takibinin yapıldığının göstergesidir. Tedarikçiden temin edilecek gıda girdileri için belirlenen kalite kriterlerinin gözetimi, son ürün kalitesinin artırılması için önemlidir.

Hazır yemek sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın, Gıda Takip Sistemi'ni tedarik zinciri yönetiminde kullanarak izlenebilirliği sağladığı bir durumda sektörde sık karşılaşılan sorunlar ve çözümler konusunda getirdiği avantajlara yönelik örnekler verilebilir. Örneğin; müşteriye teslim edilmiş olan siparişte yer alan yemek çeşidine ilişkin salçadan kaynaklı bir ekşime olduğu yönünde geri bildirim alındığını düşünelim. Bu durumda mühendis, Gıda Takip Sistemi üzerinden ilgili yemeğe ait süreci geriye dönük izlemekte ve sorunun kaynağını araştırmaktadır. Öncelikle firmada yemekten alınan numuneler kontrol edilir, yemeği yapan aşçı sorgulanabilir. Sistem üzerinden pişme, bekleme ve taşınması sürelerinde hata olup olmadığı teyit edilebilir. Mühendis, Stok Görüntüleme Ekranından yemeğin hazırlanmasında kullanılan salçaya ait parti numarası ve kalan miktar bilgisini alarak depoda gıda girdisinin kontrolünü sağlar. Stok Görüntüleme Ekranına ait bir görüntü Şekil 3'teki gibidir. Kontrol sırasında salçanın kalite kriterlerinde bir uygunsuzluk tespit ederse, malzemeyi imha eder veya tedarikçiye gönderir. Aynı salça kullanılarak yapılmakta olan bir yemek varsa derhal üretimi durdurur veya yapılmış/yolda olan başka bir sipariş varsa geri çağırır. Tedarikçiyle iletişime geçerek şikayetini bildirir, tekrarlanması durumunda veya derhal yeni tedarikçi araştırması yapılabilir.

Stok Görüntüleme Ekranı

Depo

Kuru depo

Stok Giriş Hareketleri

Malzeme	Stok Giriş Tarihi	Üretim Tarihi	Son Kullanma Tarihi	Parti Numarası
Pirinç	01.03.2021 19:26	01.09.2020 00:00	01.09.2021 00:00	0109210
Bulgur	01.03.2021 19:27	30.10.2020 00:00	30.10.2021 00:00	3010210
Nohut	01.03.2021 19:27	06.11.2020 00:00	06.11.2021 00:00	0611210
Mercimek	01.03.2021 19:28	03.12.2020 00:00	03.12.2021 00:00	0312210
Makarna	01.03.2021 19:29	13.08.2020 00:00	13.08.2021 00:00	1308210
Tel Şehriye	01.03.2021 19:29	17.09.2020 00:00	17.09.2021 00:00	1709210
Erişte	01.03.2021 19:30	15.10.2020 00:00	15.10.2021 00:00	1510210
Ayçiçek yağı	01.03.2021 19:43	07.01.2020 00:00	07.01.2022 00:00	0701220
Salça	01.03.2021 19:45	15.08.2020 00:00	15.08.2022 00:00	1508220
Kuru yekerpare	01.03.2021 19:47	13.01.2021 00:00	13.01.2022 00:00	1301220
Un	01.03.2021 19:49	20.11.2020 00:00	20.05.2021 00:00	2005210
Tuz	01.03.2021 19:50	10.03.2020 00:00	10.03.2023 00:00	1003230
Toz peker	01.03.2021 19:52	17.01.2020 00:00	17.01.2023 00:00	1701230

Stok Çıkış Hareketleri

Stok Çıkış Adı	Çıkış Miktarı	Çıkış Tarihi	Çıkış Yapan
SK166*140*123*121*28.02...	0,3 kg	2.03.2021 14:20:00	Ali
SK166*140*123*122*28.02...	0,1 kg	2.03.2021 15:35:00	Ali
SK166*144*127*124*28.02...	7,5 kg	3.03.2021 10:35:00	Koray
SK166*148*131*128*28.02...	6,375 kg	3.03.2021 14:00:00	Ali

Şekil 3. Stok Görüntüleme Ekranına ait bir görüntü (A figure of Stock Display Screen)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, bir hazır yemek firmasında kullanılmak üzere hammadde tedariğinden son ürünün müşteriye ulaştırılmasına kadar olan süreçte izlenebilirliği sağlayabilecek bir yazılım geliştirilmiş olup "Gıda Takip Sistemi" olarak adlandırılmıştır. Hazır yemek firmalarının büyük bir çoğunluğu küçük ve orta ölçekli işletme kategorisindedir. Bu sınıflandırmada yer alan firmaların, tedarik zinciri yönetiminde basit iletişim araçları kullandıkları ve izlenebilirliği sağlamak amacıyla dokümantasyona yöneldikleri bilinmektedir. Dokümantasyonla bu amaca ulaşılabilmesi için her çalışanın bağlı olduğu birimle alakalı yapmış olduğu tüm işlemleri ilgili formlara eksiksiz bir şekilde kaydetmesi ve bu formların düzenli bir şekilde arşivlenmesi gerekmektedir. Geriye dönük izlenebilirlik gerektiren durumlarda, çok sayıda evrağın incelenmesi gerektiğinden zaman kaybı kaçınılmaz olacak ve tedarik zincirinde herhangi bir aşamadaki tek bir form eksikliği dahi süreçte aksaklık yaratacaktır. Günümüz koşullarında, dokümantasyonun getirdiği zorluklar, zaman ve iş gücü kaybı yerini bilgi teknolojilerinin pratikliği ve kolaylığına bırakmalıdır. Herhangi bir altyapı kurma zorunluluğu veya maliyet gerektirmeyen bir yazılım olarak Gıda Takip Sistemi'nde veri girişi aşamasında karakter kısıtlaması olmadığından tedarik zincirine ait işlemlerde veri kaybı yaşanması gibi sorunlar oluşmamaktadır. Bu konuda yapılmış benzer bir çalışma olmadığından Gıda Takip Sistemi, bir ön çalışma olarak değerlendirilip geliştirilebilir.

Gıda Takip Sistemi'nin kurgulanması aşamasında yemek reçeteleri olarak tanımlanan veriler hazır yemek sektöründe faaliyet gösteren firmaları temsilen görüşme yapılan Anadolu Yemeği'nden temin edilmiştir. Bu veriler yerine standart reçeteler kullanılabilir. Standart reçetelerdeki girdi miktarları brüt ve net olarak belirtilerek fire oranları hesaplanabilir. Standart reçetelerdeki uyarılama faktörü kullanılarak hazırlanacak siparişler için gerekli girdilere ait sayısal değerlerin saptanması kolaylaşır. Sistemde, kullanılan girdilerin birim fiyatlarına yer verildiği takdirde yemek maliyetleri ortaya çıkar. Bu durum, üretim ve satın alma planlamalarının geliştirilmesi noktasında avantaj sağlar.

Bu çalışmada, gıda girdilerine ait kalite kriterlerinin belirlenmesinde mevzuat baz alınmıştır. Bu kriterlerin yanında, standart reçetelerin uygulanabilmesi için ek kriterler belirlenebilir (pirinç için baldo, jasmine, kırık vb. çeşit bilgisi). Kullanılan girdilere ait detaylara yer verildiği takdirde üretimin standartlaşması kaçınılmaz olacaktır. Mevzuattan alınmış kalite kriterleri ve girdi çeşitlerine ilişkin detayların yer aldığı standart ürün şartnameleri oluşturularak tedarikçilere bildirildiğinde talep noktasında şeffaflık artar. Gıda Takip Sistemi'nde reçetelerin tanımlanarak birleştirilmesiyle oluşturulan menüler üzerinden müşterilerden sipariş alınmaktadır. Uygulama geliştirilerek menü yapılmaksızın çeşit seçiminde müşteri talebine göre esneklik sağlanabilir. Örneğin; çorba bölümü, ana yemek bölümü, salata bölümü vb. başlıklar altında reçeteler kaydedilirse müşteri kendi menüsünü oluşturabilir. Böylece, müşteri memnuniyetinin artırılması noktasında avantaj sağlanabilir.

Gıda Takip Sistemi, firma içi faaliyeti kapsamaktadır. Hazır yemek firmalarının büyük bir kısmının bilgi teknolojileri kullanımına uzak olduğu düşünülerek uygulamanın kademeli olarak geliştirilmesinin daha anlaşılır olacağı öngörülmüştür. Sektörde faaliyet gösteren firmalar, girdi çeşidi fazla olduğundan çok sayıda tedarikçi ile çalışmaktadır. Dolayısıyla, Gıda Takip Sistemi'nin her bir tedarikçinin bilgisayarına yüklenmesi ve kullanımının gösterilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, tedarikçiler bu çalışmanın dışında tutulmuştur. Hazır yemek firmalarının Gıda Takip Sistemi ve benzeri izlenebilirlik uygulamalarını kullanmayı benimsemeleri durumunda iş ortakları olan tedarikçilerine de sistem kurma zorunluluğu getirmeleri kaçınılmaz olacaktır. İlerleyen aşamalarda sistemin geliştirilerek tedarikçilerin de dahil edildiği bir senaryoda; tedarikçilerin depolarındaki malzemeleri görüntüleme entegrasyonu yapılabilir veya gıda ürünlerine ait kalite kriterlerinin sağlandığına dair kanıt olarak ürün test sonuçları, sertifika bilgileri vb. eklenebilir. Bu şekilde, sipariş verilirken talep edilen kriterleri hangi tedarikçilerin sağladığı kontrolü hızlandırılabilir veya hangi tedarikçiden daha hızlı ürün temin edilebileceği noktasında iş akışı iyileştirilebilir.

Gıda Takip Sistemi, farklı teknolojilerle kombine edilerek geliştirilebilir. Örneğin, bozulma riski yüksek ürünlerde soğuk zincirin kırılmadığının bir kanıtı olarak sıcaklık ölçen RFID sensörleri kullanılabilir. Tedarikçiden temin edilen ve RFID sensörü içeren ürün, geçmişine ait detaylı veri sağlayabilir. Bu şekilde, stoktaki risk seviyesi daha öngörülebilir hale gelir. Gıda Takip Sistemi, farklı bir teknolojiyle kombine edilmek istendiği takdirde cihaz entegrasyonu yapılması gerekmektedir. Bu aşamada kullanılacak sensörler veri paylaşımına uygun olmalıdır. Gıda Takip Sistemi, bir sonucu üzerine kurularak bu sensörlerden elde edeceği verileri ilgili gıda ürünleriyle eşleştirmelidir. Böylece, sensörler aracılığıyla sağlanan veriler Gıda Takip Sistemi'nde kullanılabilir duruma gelecektir.

Yeni bir teknolojinin/sistemin benimsenmesi; uygulamanın kullanışlı, faydalı ve gerekli olduğunun anlaşılmasıyla ilişkilidir. Dolayısıyla, izlenebilirlik ve tedarik zinciri yönetimi ile ilgili kavramların doğru algılanması, firmaların bu konuda var olan teknolojilere karşı tutumlarını etkileyecektir. Hazır yemek sektöründe faaliyet göstermekte olan firmalar, mevzuattaki zorunluluklarını yerine getirerek izlenebilirliğin sağlanmasına imkan veren bilgi teknolojilerini kullanmaya başlamalı, tedarik zincirlerini şeffaflaştırarak tüketici taleplerine yanıt vermelidir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmada, geliştirilen sistemin kurgulanması aşamasında firma işleyişi ile ilgili bilgilerini paylaşan Anadolu Yemeği'ne 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)

- Aydın, Ş., Çoban, Ö., Karakuş, Y., Çalışkan, N., 2019. 4. Uluslararası Gastronomi Turizmi Araştırmaları Kongresi Bildiri Kitabı, Karaca, E., Nergiz, H.G. (Edt.), Beş yıldızlı bir otel mutfağının bilişim sistemi kullanımının incelenmesi, içinde (s. 40-46).
- Anonim, 2010. Veteriner Hizmetleri, Bitki Sağlığı, Gıda ve Yem Kanunu. Kanun No: 5996, 13.06.2010 tarihli ve 27610 sayılı Resmi Gazete.
- Brennan, J.G., Grandison, A.S., 2012. Food Processing Handbook. Knight, C., Traceability in Food Processing and Distribution, içinde (s. 515-531). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Farahani, P., Grunow, M., Günther, H.O., 2009. A heuristic approach for short-term operations planning in a catering company. Proceedings of the 2009 IEEE IEEM, 1131- 1135.
- Fidan, Z., 2018. Soğuk ve Donuk Gıdalarda Tedarik Zinciri Yönetimi Sürecine Kalite Sistemlerinin Katkısı. Yüksek Lisans Tezi, Yaşar Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Gölge, E., Türk, T., 2019. A geographical information system (GIS) based traceability system suggestion for a pastry firm operating nationwide. Cumhuriyet Science Journal, 40(1), 245-252.

- Jen, J.J., Chen, J., 2017. Food Safety in China: Science, Technology, Management and Regulation, Food Safety in Restaurants and Catering, Ma, Z., Lap-Yang Tung D. (Edt.), içinde (s. 419-437), John Wiley & Sons Ltd.
- Kaya, S.Y., İlhan, S., 2018. Toplu yemek (hazır yemek) sektöründe yaşanan problemler ve çözüm önerileri. Güncel Turizm Araştırmaları Dergisi, 2(Ek.1), 553-581.
- Keleş, B. ve Ova, G., 2020. Gıda tedarik zinciri yönetiminde bilgi teknolojileri kullanımı. Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 17(1), 137-143.
- Leadley, C., 2016. Innovation and Future Trends in Food Manufacturing and Supply Chain Technologies, 308 p., Mahalik, N., Kim, K. (Edt.), The role of information technology developments in food supply chain integration and monitoring, içinde (s. 21-37), Elsevier Ltd.
- Li, D., Chunjiang, Z., 2009. Computer and Computing Technologies in Agriculture II, Ratcliff, J., Boddington, M. (Edt.), Practical use of IT in traceability in food value chains, içinde (s. 2161-2175), Springer.
- Oral, E., 2009. Tarım Ürünlerinin Gıda Güvenliği Bilgi Sistemleri İle İzlenebilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Parseker, Z., 2009. Gıda Sektörü Tedarik Zincirinde Bilgi Teknolojileri Kullanımının Ekonomik Yönden Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Sezgin, A.C., Özkaya, F.D., 2014. Toplu beslenme sistemlerine genel bir bakış. Akademik Gıda, 12(1), 124-128.
- Sıkı, H.T., 2011. Hatay'da Süt Sektöründe İzlenebilirliğin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Şen, M.A., 2020. Hazır yemek sektöründe çalışan gıda mühendislerinin sorunları. Akademik Gıda, 18(1), 73-78.
- Tatlıhoğlu, F., 2010. Havaçılık Tedarik Zincirinde İkram Hizmetlerinin İncelenmesi ve Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- TGK, 2019. Türk Gıda Kodeksi Et, Hazırlanmış Et Karışımları Ve Et Ürünleri Tebliği (Tebliğ No: 2018/52), 29.01.2019 tarihli ve 30670 sayılı Resmi Gazete.
- TGK, 2011. Türk Gıda Kodeksi Mikrobiyolojik Kriterler Yönetmeliği, 29.12.2011 tarihli ve 28157 sayılı Resmi Gazete.
- TGK, 2011. Türk Gıda Kodeksi Mikrobiyolojik Kriterler Yönetmeliği, 29.12.2011 tarihli ve 28157 sayılı Resmi Gazete, 09.10.2018 tarihli 30560 sayılı değişiklik.
- TGK, 2011. Türk Gıda Kodeksi Pirinç Tebliği (Tebliğ No: 2010/60), 07.01.2011 tarihli ve 27808 sayılı Resmi Gazete.
- TGK, 2017. Türk Gıda Kodeksi Bulgur Tebliği (Tebliğ No: 2016/49), 26.01.2017 tarihli ve 29960 sayılı Resmi Gazete.
- TGK, 2003. Türk Gıda Kodeksi Mercimek Tebliği (Tebliğ No: 2003/25), 26.07.2003 tarihli ve 25180 sayılı Resmi Gazete.
- TGK, 2002. Türk Gıda Kodeksi Makarna Tebliği (Tebliğ No: 2002/ 20), 05.03.2002 tarihli ve 24686 sayılı Resmi Gazete.
- TGK, 2012. Türk Gıda Kodeksi Bitki Adı İle Anılan Yağlar Tebliği (Tebliğ No: 2012/29), 12.04.2012 tarihli ve 28262 sayılı Resmi Gazete.
- TGK, 2020. Türk Gıda Kodeksi Salça Ve Benzeri Ürünler Tebliği (Tebliğ No: 2020/19), 13.08.2020 tarihli ve 31212 sayılı Resmi Gazete.
- TGK, 2009. Türk Gıda Kodeksi Fermente Süt Ürünleri Tebliği (Tebliğ No:2009/25), 16.02.2009 tarihli ve 27143 sayılı Resmi Gazete.
- TGK, 2013. Türk Gıda Kodeksi Buğday Unu Tebliği (Tebliğ No:2013/9), 02.04.2013 tarihli ve 28606 sayılı Resmi Gazete.
- TGK, 2014. Türk Gıda Kodeksi Yumurta Tebliği (Tebliğ No:2014/55), 20.12.2014 tarihli ve 29211 sayılı Resmi Gazete.
- TGK, 2006. Türk Gıda Kodeksi Şeker Tebliği (Tebliğ No: 2006/40), 23.08.2006 tarihli ve 26268 sayılı Resmi Gazete.
- TGK, 2013. Türk Gıda Kodeksi Tuz Tebliği (Tebliğ No:2013/48), 16.08.2013 tarihli ve 28737 sayılı Resmi Gazete.
- TGK, 2013. Türk Gıda Kodeksi Baharat Tebliği (Tebliğ No:2013/12), 10.04.2013 tarihli ve 28614 sayılı Resmi Gazete.
- TSE, 2017. TS 13470 Şerbet eklenmeye hazır hamur tatlıları standardı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Zhang, M., Li, P., 2012. RFID application strategy in agri-food supply chain based on safety and benefit analysis. Physics Procedia, 25, 636 - 642.



AKI VE KAYMA FREKANSI KESTİRİMİ İLE ASENKRON MOTORUN ALGILAYICISIZ SKALER HIZ DENETİMİ

Mehmet Onur GÜLBAHÇE^{1,2*}, Muhammed Emin KARAASLAN²

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

²Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Akı Kestirimi, Kayma Frekansı Kestirimi, Skaler Hız Denetimi, Algılayıcısız Hız Denetimi, Asenkron Motor.</i>	Bu çalışma, asenkron motorun hız kontrolü için algılayıcısız bir skaler denetim algoritması ortaya koymaktadır. İlk olarak, motor gerilimleri ve akımları ölçülerek stator akısı tahmin edilmiş ardından asenkron motorun matematiksel modeline göre kayma frekansı hesaplanmış ve uygulanması gereken gerilim değeri kayma frekansının değerine göre yeniden hesaplanmıştır. Stator direncinin üzerindeki düşen gerilimi kompanze etmek için otomatik gerilim yükseltme kontrolörü tasarlanmıştır. Kontrolör parametreleri doğadan ilham alan optimizasyon algoritmalarından olan genetik algoritma ile hesaplanmıştır. Son olarak, önerilen kontrol algoritmasının başarımını irdelemek için, 18 kW'lık bir asenkron motorda geniş bir hız aralığında benzetim sonuçları verilmiştir.

SENSORLESS SCALAR SPEED CONTROL OF INDUCTION MOTOR WITH FLUX AND SLIP FREQUENCY ESTIMATION

Keywords	Abstract
<i>Flux Estimation, Slip Frequency Estimation, Scaler Control, Sensorless Speed Control, Induction Motor.</i>	This study presents a sensorless scalar control algorithm for speed control of induction motor. Firstly, the stator flux was estimated by measuring the motor voltages and currents, then the slip frequency was calculated according to the mathematical model of the induction motor and the voltage value to be applied was recalculated according to the value of the slip frequency. An auto-voltage boost controller is designed to compensate for the dropping voltage on the stator resistor. Controller parameters were calculated with a genetic algorithm, which is one of the nature-inspired optimization algorithms. Finally, simulation results over a wide speed range are given for an 18 kW induction motor to examine the performance of the proposed control algorithm.

Alıntı / Cite

Gülbahçe, M. O., Karaaslan, M. E., (2022). Akı ve Kayma Frekansı Kestirimi ile Asenkron Motorun Algılayıcısız Skaler Hız Denetimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 228-237.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. O. Gülbahçe, 0000-0002-6689-8445
M. E. Karaaslan, 0000-0002-2542-1704

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	29.07.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	19.09.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	01.10.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde basit yapıları, düşük maliyetleri ve daha az bakıma ihtiyaç duymaları gibi avantajları sayesinde asenkron motorlar gerek endüstriyel uygulamalarda, gerekse ev tipi tahrik uygulamalarında sıkça karşımıza çıkmaktadır. Çok geniş bir kullanım alanına sahip olan asenkron motorların farklı hızlarda tahrik edilen sistemlerde kullanılabilmesi için hız denetiminin geniş bir aralıkta ve gürbüz denetim algoritmaları ile yapılması zorunlu hale gelmiştir (Çakır vd., 2009).

* İlgili yazar / Corresponding author: ogulbahce@itu.edu.tr, +90-537-213-7960

Hız denetiminin zor olması ve farklı uygulamalar için hız denetiminin kritik bir öneme sahip olması sebebi ile asenkron motorların kontrolünde yüksek kalite ve verimliliğe sahip sürücü sistemlerine gereksinim duyulmaktadır (Çukur, 2015). Literatürde asenkron motorların hız denetiminin geniş bir aralıkta, yüksek verimlilikte yapılabilmesi için farklı çalışmalar mevcuttur (Aydeniz, 2005). Bu çalışmalar temel olarak vektör ve skaler denetim yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu yöntemler ise kendi içlerinde algılayıcı ve algılayıcı olmayan hız denetimi olarak iki grupta incelenebilir.

Tüm hız denetim yöntemlerinde asenkron motorun stator sargıları bir evirici üzerinden beslenir. Eviricinin anahtarlama sırasının belirlenmesi için asenkron motorun anlık hız bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Asenkron motorun algılayıcı hız denetimi motor miline yerleştirilen bir hız algılayıcısı ile motor hızının ve konumunun belirlenmesi ile gerçekleştirilir. Fakat algılayıcılar özellikle düşük güçlü motorların kullanımında neredeyse motor ile aynı maliyetlere kadar gelebilmesi, bağlantı elemanlarının artması, hassasiyeti, bakım gerektirmesi ve fiziksel bir eleman olmasından kaynaklanan arızalanma veya bozulma gibi problemleri de beraberinde getirmektedir (Dere, 2012). Bu problemlerin ortadan kaldırılabilmesi için literatürde birçok algılayıcı olmayan hız denetim yöntemi geliştirilmiştir. Algılayıcı olmayan hız denetim yöntemlerinde, hız denetimi için gerekli olan motor hızı fiziksel bir algılayıcı yerine motor hızını matematiksel işlemler ile tahmin edebilecek bir gözleyici tarafından yapılmaktadır (Sun, 2014). Bonanno vd. (1995), Schauder (1992), Peng ve Fukao (1994), Küllaç (2011) ve Zerdali (2016) gibi çalışmalarda asenkron motorun algılayıcı olmayan hız denetimi ile alakalı birçok yöntem önerilmiştir. Algılayıcı veya algılayıcı olmayan şekilde elde edilen bu hız-konum bilgisinin daha önce bahsedilen vektör denetim yöntemlerinde veya skaler denetim yöntemlerinde kullanılması ile asenkron motorun hız denetimi yapılmaktadır.

Vektör denetim yöntemleri kendi içerisinde alan yönlendirmeli denetim ve doğrudan moment denetimi olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu yöntemlerden yaygın olarak kullanılan alan yönlendirmeli denetim yöntemi, anlık olarak moment denetimi yapma kabiliyetine sahip olması ile ön plana çıkmaktadır (Bakan, 2002). Bu sayede motorun anlık hız değişimlerine karşı oldukça hızlı bir şekilde cevap verebilmektedir. Fakat diğer vektör denetim yöntemleri gibi alan yönlendirmeli denetim yöntemi de motor modeline dayalı olarak yapıldığı için asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerine karşı oldukça duyarlıdır (Bingöl, 2006). Bu yüzden vektör denetim yöntemlerinin başarılı bir şekilde yapılabilmesi için asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin bilinmesi büyük bir önem arz etmektedir. Ayrıca motorun çalışması anında eşdeğer devre parametrelerinde değişiklikler olabileceği için motor parametrelerini eş zamanlı olarak tahmin eden bir gözleyiciye de ihtiyaç duyulmaktadır.

Anlık hız değişimlerine hızlı bir şekilde cevap veren vektör denetim yöntemleri geliştirilmesine karşın geçici durum başarımının kritik olmadığı pompalar, kompresörler, ısıtma veya soğutma sistemleri, havalandırma sistemleri, klimalar, imalat ve diğer birçok uygulamada skaler denetim yöntemleri sıklıkla tercih edilmektedir (Zhang ve Bazzi 2019). Son derece az maliyetli ve kolay gerçekleştirilebilir olmaları sebebi ile geniş bir kullanım alanına sahip olan skaler denetim yöntemleri hakkında literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Otkun (2020) çalışmasında asenkron motorun algılayıcı skaler hız denetimini fark frekans yöntemi ile yapmıştır. Fark frekans yöntemi motordan alınan frekans bilgisinin referans olarak verilen frekans bilgisi ile karşılaştırılmasına dayanan bir yöntemdir. Zhang ve Bazzi (2019) çalışmalarında düşük hızlarda verimli bir şekilde çalışabilen algılayıcı olmayan skaler denetim yöntemi önermiştir. Adıku vd. (2015) orta gerilim, yüksek güçlü asenkron motorlar için uzay vektör darbe genişlik modülasyonu yöntemini de içeren algılayıcı olmayan skaler denetim yöntem üzerine çalışmalar yapmıştır. Wang ve Fang (2003) çalışmalarında modifiye edilmiş bir akı gözleyicisi yardımı ile asenkron motorun algılayıcı olmayan skaler hız denetimini gerçekleştirmiştir. Chen vd. (2014) çalışmalarında asenkron motorun algılayıcı olmayan skaler denetimi için akı kontrolü de yapabilen bir yöntem önermiştir. Fakat önerilen bu yöntemin farklı hız referansı değerleri ile yapılan testlerinde kararlı olmayan çalışma bölgelerini barındırdığı gözlemlenmiştir.

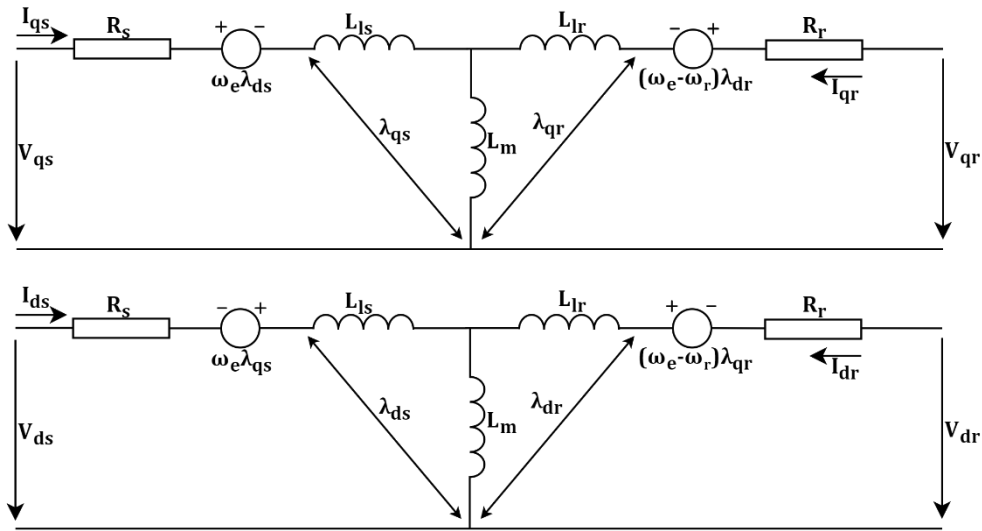
Literatürdeki çalışmalar gibi asenkron motorun algılayıcı olmayan skaler hız denetimi için birçok yöntem bulunmaktadır. Fakat belirtilen bu yöntemlerin bazıları düşük hızlarda, bazıları yüksek hızlarda, bazıları yüksek, bazıları düşük güçlü motorlarda başarı göstermektedir. Ayrıca gerçek hayat uygulamalarında önerilen yöntemin ve algılayıcının basit bir yapıda olması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle pek çok yöntem endüstriyel uygulamalarda elenir.

Bu çalışmada asenkron motorun skaler hız denetimi için algılayıcı olmayan bir denetim algoritması tasarlanmıştır. İlk olarak, motor gerilimleri ve akımları ölçülerek stator akısı tahmin edilmiştir. Daha sonra asenkron motorun matematiksel modeline göre kayma frekansı kestirilmiş ve uygulanması gereken gerilim değeri kayma frekansının değerine göre yeniden hesaplanmıştır. Stator direncinin üzerindeki düşen gerilimi kompanze etmek için otomatik gerilim yükseltme kontrolörü tasarlanmıştır. Kontrolör parametreleri doğadan ilham alan optimizasyon algoritmalarından olan genetik algoritma ile hesaplanmıştır. Dahası önerilen sistemin başarımı 18 kW'lık bir asenkron motor üzerinde benzetim yolu ile irdelenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde asenkron motorun matematiksel modeline ait detaylar ve matematiksel eşitlikler verilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde ise kullanılacak olan skaler denetim yöntemi detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Çalışmanın dördüncü bölümünde ise

algılayıcısız hız denetimini yapmak için tasarlanan kayma ve akı gözleyicisi detayları ile beraber verilmiştir. Son olarak ise tasarlanan bu sistem farklı referans hız değerleri için benzetimi yapılmış ve farklı çalışma koşulları altında başarımlı irdelenmiştir.

2. Asenkron Motor Modeli (Induction Motor Model)

Asenkron motorun değişkenlik gösteren çalışma koşullarında ve sahip olduğu karmaşık yapıda işlem yapmak oldukça zaman alıcı olmasının yanı sıra hata yapma olasılığını da artırmaktadır. Bu problemlerin olabildiğince azaltılması için asenkron motorun içerisine yerleştirilen ve birbirinin aynı olan üç faz sargısının oluşturduğu stator ve rotor bobinleri düşünülerek motorun bir fazına ait eşdeğer devre modeli kullanılmaktadır (Zorlu ve Mergen, 2000). Bu sayede hem yapılan hesaplamalar kolaylaşır hem de hata yapma riski düşürülmüş olur. Asenkron motorun bir fazına ait bu eşdeğer devre motorun hem çalışma şeklinin daha iyi anlaşılabilmesi için hem de daha kolay bir şekilde analiz edilmesi için uzun yıllardır kullanılmaktadır (Diaz vd., 2009). Bu çalışma kapsamında asenkron motorun d-q referans çerçevesine ait eşdeğer devresi kullanılacaktır. Referans çerçeve fikri, belirli bir referans çerçeve içindeki sinüzoidal büyüklüğü başka bir referans çerçeve içinde sabit bir büyüklüğe çevirme fikrine dayanır (Okta, 2009). Asenkron motorun d-q referans çerçevesine ait eşdeğer devre modeli Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Asenkron motorun d-q referans çerçevesi takımı dinamik eşdeğer devresi (d-q reference frame dynamic equivalent circuit of induction motor)

Burada R_s stator direncini, L_s stator endüktansını, L_m kaçak endüktansı, R_r rotor direncini ve L_r rotor endüktansını temsil etmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan asenkron motorun d-q referans çerçevesine ait matematiksel eşitlikler Şekil 1'de verilen asenkron motorun d-q referans çerçevesine ait eşdeğer devresi ve referans çerçeve teorisi kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan bu eşitlikler Eşitlik (1) ve Eşitlik (8) arasında gösterilmiştir. Burada V_{ds} ve V_{qs} sırasıyla d ve q ekseninde stator gerilimlerini, I_{ds} ve I_{qs} sırasıyla d ve q ekseninde stator akımlarını, λ_{ds} ve λ_{qs} sırasıyla d ve q ekseninde stator akılarını, λ_{dr} ve λ_{qr} ise sırasıyla d ve q ekseninde rotor akılarını temsil etmektedir. Ayrıca w ve w_r koordinat çerçevesinin ve asenkron motorun açısal hızlarını, τ_r rotor zaman sabitini, σ kaçak faktörü temsil etmektedir.

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad , \quad L_r = L_{lr} + L_m \quad (1)$$

$$\bar{\lambda}_{ds} = V_{ds} - R_s i_{ds} + w \lambda_{qs} \quad (2)$$

$$\bar{\lambda}_{qs} = V_{qs} - R_s i_{qs} - w \lambda_{ds} \quad (3)$$

$$\bar{\lambda}_{dr} = -\frac{\lambda_{dr}}{\tau_r} + (w - w_r) \lambda_{qr} + \frac{L_m i_{ds}}{\tau_r} \quad (4)$$

$$\bar{\lambda}_{qr} = -\frac{\lambda_{qr}}{\tau_r} + (w - w_r)\lambda_{dr} + \frac{L_m i_{qs}}{\tau_r} \quad (5)$$

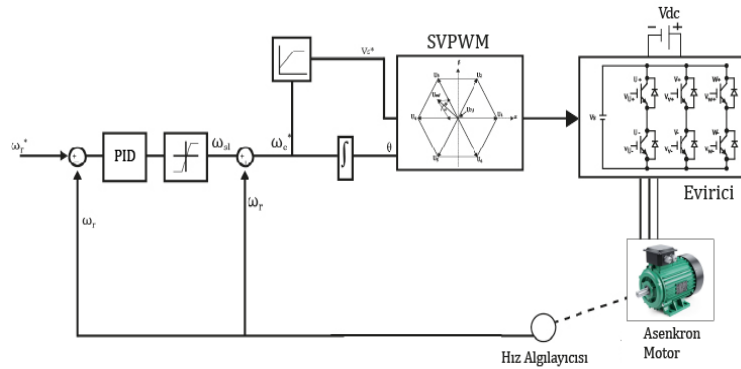
$$\lambda_{dr} = L_r \frac{\lambda_{ds} - \sigma L_s i_{ds}}{L_m} \quad (6)$$

$$\lambda_{qr} = L_r \frac{\lambda_{qs} - \sigma L_s i_{qs}}{L_m} \quad (7)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad , \quad \tau_r = \frac{L_m}{R_r} \quad (8)$$

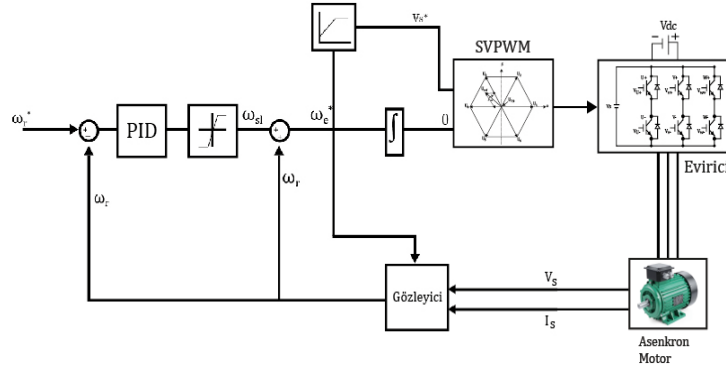
3. Skaler Denetim (Scalar Control)

Skaler denetim yöntemi birim frekans başına düşen gerilim oranının (V/f) sabit tutulmasını esas aldığı için aynı zamanda V/f denetimi olarak da isimlendirilmektedir. Bu yöntemde hava boşluğu akısının sabit tutulurken asenkron motorun hız denetiminin sağlanması için motoru besleyen gerilim doğrusal olarak değiştirilmektedir. Değişen gerilim ile beraber V/f oranının değişmemesi için frekans da değiştirilmelidir. Geleneksel bir skaler denetim modeli Şekil 2'de gösterilmiştir. Burada referans hız ve bir hız algılayıcısı ile ölçülen motor hızı arasındaki fark öncelikle bir PI denetleyicisinden geçirilir. Çıkan sonuçların belirli limitler dâhilinde kalabilmesi için bir doyuma (saturation) bloğundan geçirilir ve kayma hızı (w_{sl}^*) elde edilir. Daha sonra elde edilen kayma hızı motor hızı ile toplanarak elde edilen açısız hız (w_e^*) motorun V/f karakteristiğini temsil eden V/f fonksiyonuna uygulanır ve referans gerilim (V_s^*) elde edilir. Sonrasında ise referans gerilimi ve açısız hız değerlerinden uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (SVPWM) yardımıyla asenkron motorun beslenmesi türetilir. Ayrıca önerilen skaler denetiminin daha geniş bir aralıkta gürbüz bir şekilde yapılabilmesi için PI denetleyicinin katsayılarının belirlenmesi büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışma kapsamında kullanılan PI denetleyicisinin parametrelerinin belirlenmesi için doğadan ilham alan optimizasyon algoritmalarından en çok bilinen Genetik Algoritma yöntemi kullanılmış, yöntemin detayları ise Bölüm 3.1'de verilmiştir.



Şekil 2. Geleneksel kapalı çevrim V/f denetimi (Conventional closed loop V/f control)

Şekil 2'de gösterilen kapalı çevrim hız denetim sistemde kullanılan hız algılayıcısının arızalanma, bozulma, bakım ihtiyacı gibi dezavantajlarının yanı sıra özellikle düşük güçlerdeki uygulamalarda neredeyse kullanılan motor ile aynı miktarda bir maliyeti beraberinde getirmesi asenkron motorların algılayıcısız hız denetiminin ortaya çıkmasında büyük bir rol oynamıştır. Asenkron motorun algılayıcısız hız denetimi asenkron motorun hızının motor miline yerleştirilen bir hız algılayıcısı yerine motorun kolaylıkla ölçülebilen gerilim ve akım değerlerinden kestirilmesi ile gerçekleştirilir. Bu çalışma kapsamında tasarlanmış olan asenkron motorun algılayıcısız skaler hız denetimi modeli Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Önerilen algılayıcısız skaler denetim sistemi (Proposed sensorless scalar control system)

3.1. PI Katsayılarının Genetik Algoritma ile Belirlenmesi (Equivalent Circuit of Induction Motor)

Özellikle kapalı çevrim sistemlerin istenilen özelliklerde çalışmasını sağlayan denetleyici yapılarının tasarımı ve analizi kontrol teorisinin önemli alanlarından. PI (oransal-integral) denetleyiciler bu alanda geliştirilen farklı karakteristiklere ve yapıya sahip olan denetleyiciler içinde özellikle endüstriyel amaçlı en çok tercih edilen yapıdır (Vatansever ve Deniz 2013). PI denetleyicilerinin parametreleri deneysel olarak veya analitik olarak belirlenebilmektedir. Bu bağlamda sistemin zaman veya frekans bölgesi cevaplarını kullanarak uygun parametreleri belirleyen birçok yöntem bulunmaktadır (Batık vd., 2014). Bu yöntemlerden bazıları; Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Chien Hrones Reswick, Wang-Juang-Chan olarak sıralanabilir. Fakat özellikle karmaşık yapıya sahip kapalı çevrim sistemlerde sistemin matematiksel modelinin doğru bir şekilde çıkarılması, buna bağlı olarak PI parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi oldukça karmaşık ve zor matematiksel işlemler içermektedir.

Özellikle son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmelerin ışığında bu karmaşık matematiksel işlemleri ve bu işlemler dolayısı ile oluşabilecek olası hataları ortadan kaldırmak amacı ile birçok çalışma yapılmaktadır. Bu alanda yapay zekadan ve üst-sezgisel optimizasyon algoritmalarından büyük bir oranda faydalanılabilmektedir (Burns 2001). Bu çalışmada kullanılan PI denetleyicisinin parametrelerinin tahmini için genetik algoritma yöntemi kullanılmıştır. Genetik algoritma doğal evrim teorisinden esinlenilerek oluşturulmuş evrimsel tabanlı sezgisel bir algoritmadır (Dokur vd., 2021). Algoritmada popülasyon büyüklüğü seçildikten sonra popülasyon başlatılır daha sonra uygunluk fonksiyonu hesaplanır ve sonlandırma kriterleri kontrol edilir. Sonlandırma kriterleri sağlanmamış ise üreme, mutasyon, çaprazlama gibi genetik operatörler kullanılarak yeni bir popülasyon üretilir ve uygunluk fonksiyonu hesaplanır. Bu işlem sonlandırma kriterleri sağlanıncaya kadar devam eder (Gülbağçe vd., 2013). Bu algoritma sayesinde PI katsayıları yüksek başarımla bulunabilmektedir. Fakat bu katsayıların hem daha başarılı hem de daha kısa sürede bulunabilmesi için alt ve üst sınır koşulları, popülasyon sayısı, döngü sayısı gibi değerlerin doğru bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan genetik algoritma parametreleri Tablo 1’de gösterilmiştir. Algoritma sonucunda oransal (P)=740.05, integral (I)= 4.3078 olarak belirlenmiştir. Bu değerler motor parametrelerine ve çalışma hızı aralığına bağlı olarak değişim göstermektedir.

Tablo 1. Genetik Algoritmada Kullanılan Parametreler (Parameters used in Genetic Algorithm)

Değişken Sayısı	Alt Limit (Oransal)	Alt Limit (İntegral)	Üst Limit (Oransal)	Üst Limit (İntegral)	Popülasyon Sayısı	Döngü Sayısı
2	0	0	1000	10	50	100

4. Kayma ve Akı Gözleyicisi (Slip and Flux Observer)

4.1. Kayma Gözleyicisi (Slip Observer)

Eşitlik 4 ve 5 rotor referans çerçevesi ($w = w_r$) için düzenlenecek olursa Eşitlik 9 ve 10 elde edilebilir. Burada “r” rotor referans çerçevesini temsil etmektedir.

$$\frac{d\lambda_{dr}^r}{dt} = -\frac{\lambda_{dr}^r}{\tau_r} + \frac{L_m i_{ds}^r}{\tau_r} \quad (9)$$

$$\bar{\lambda}_{qr}^r = -\frac{\lambda_{qr}^r}{\tau_r} + \frac{L_m i_{qs}^r}{\tau_r} \quad (10)$$

Rotor referans çerçevesi w_r açısal hızı ile döneceği için λ_{dr}^r ve λ_{qr}^r değerleri kayma frekansı (w_{sl}) ile değişir.

$$w_{sl} = \tan^{-1} \frac{\lambda_{qr}^r}{\lambda_{dr}^r} = \frac{\lambda_{dr}^r \bar{\lambda}_{qr}^r - \lambda_{qr}^r \bar{\lambda}_{dr}^r}{\lambda_{dr}^r{}^2 + \lambda_{qr}^r{}^2} \quad (11)$$

Eşitlik 11, Eşitlik 6, 7, 9 ve 10 yardımı ile düzenlenirse;

$$w_{sl} = \frac{L_m^2}{L_r^2} \frac{R_r \vec{\lambda}_s * \vec{i}_s}{(\vec{\lambda}_s - \sigma L_s \vec{i}_s) \cdot (\vec{\lambda}_s - \sigma L_s \vec{i}_s)} \quad (12)$$

Burada * vektörel çarpımı \cdot iç çarpımı göstermektedir.

4.2. Akı Gözleyicisi (Flux Observer)

Eşitlik 2 ve 3 duran referans çerçeve ($w = 0$) için yeniden düzenlenecek olursa Eşitlik 13 ve 14 elde edilir. Burada "s" simgesi duran referans çerçeveyi temsil ederken e_{ds}^s ve e_{qs}^s ise d^s ve q^s eksenlerindeki endüklenen gerilimleri temsil etmektedir.

$$\bar{\lambda}_{ds}^s = e_{ds}^s = V_{ds}^s - R_s i_{ds}^s \quad (13)$$

$$\bar{\lambda}_{qs}^s = e_{qs}^s = V_{qs}^s - R_s i_{qs}^s \quad (14)$$

Eşitlik 13 ve 14'teki denklemler açık-çevrimde akı kestirimi için yeniden yazılabilir. $\hat{\lambda}$ simgesi kestirilen değeri göstermektedir.

$$\hat{\lambda}_{ds}^s = \hat{e}_{ds}^s = V_{ds}^s - R_s i_{ds}^s \quad (15)$$

$$\hat{\lambda}_{qs}^s = \hat{e}_{qs}^s = V_{qs}^s - R_s i_{qs}^s \quad (16)$$

Kestirim için yazılan eşitliklerde meydana gelen başlangıç değer hatası ve doğru akım bileşeni hatası ortaya çıkmaktadır. Bu hataları giderebilmek için gözleyiciye kesim frekansı w_c olan kaskad bir yüksek geçiren süzgeç bağlanır (Bonanno vd., 1995). Bağlanan süzgeç sonrasında eşitlikler Eşitlik 17 ve 18'deki gibi yeniden yazılabilir.

$$\hat{\lambda}_{ds}^f = -w_c \hat{\lambda}_{ds}^f + \hat{e}_{ds}^s \quad (17)$$

$$\hat{\lambda}_{qs}^f = -w_c \hat{\lambda}_{qs}^f + \hat{e}_{qs}^s \quad (18)$$

λ_s akının genliği, w_e ise elektriksel frekans olmak üzere akının d ve q eksenlerindeki bileşenleri Eşitlik 19 ve 20'deki gibi gösterilebilir.

$$\lambda_{ds}^s = \lambda_s \cos(w_e t) \quad (19)$$

$$\lambda_{qs}^s = \lambda_s \sin(w_e t) \quad (20)$$

Eşitlik 19 ve 20, Eşitlik 13 ve 14'te yerine yazılırsa;

$$e^s_{ds} = -w_e \lambda_s \sin(w_e t) \quad (21)$$

$$e^s_{qs} = w_e \lambda_s \cos(w_e t) \quad (22)$$

eşitlikleri elde edilir. Elde edilen bu eşitlikler statorda endüklenen gerilimin kestiriminde kullanılabilir. Fakat pratik uygulamalarda endüklenen gerilimin üzerinde bir doğru ofset gerilimi eklenecektir. Dolayısı ile kestirim için kullanılacak olan denklemlerde bu etkinin belirtilmesi gerekir. Eşitlik 23 ve 24'te V_{off} doğru ofset geriliminin etkisini göstermektedir.

$$\hat{e}^s_{ds} = -w_e \lambda_s \sin(w_e t) + V_{off} \quad (23)$$

$$\hat{e}^s_{qs} = w_e \lambda_s \cos(w_e t) + V_{off} \quad (24)$$

Eşitlik 23 ve 24 Eşitlik 17 ve 18'de yerine yazılmış, gerekli düzenlemeler yapılmış ve d-q eksenlerindeki akı kestirimine ait Eşitlikler 25 ve 26'de gösterilmiştir.

$$\hat{\lambda}^f_{ds} = k_d e^{-w_c t} + \frac{V_{off}}{w_c} + A_f + \lambda_s \cos(w_e t + \Delta\varphi) \quad (25)$$

$$\hat{\lambda}^f_{qs} = k_q e^{-w_c t} + \frac{V_{off}}{w_c} + A_f + \lambda_s \sin(w_e t + \Delta\varphi) \quad (26)$$

Burada A_f genlik zayıflama oranı, $\Delta\varphi$ kestirilen akı ile gerçek akı arasındaki faz kaymasını temsil ederken, k_d ve k_q değerleri ise doğru ofset geriliminin başlangıç değeri ile ilintili olan sabitlerdir.

$$A_f = \frac{k}{\sqrt{k^2 + 1}} \quad , \quad \Delta\varphi = \text{sign}(w_e) \tan^{-1} \frac{1}{k} \quad (27)$$

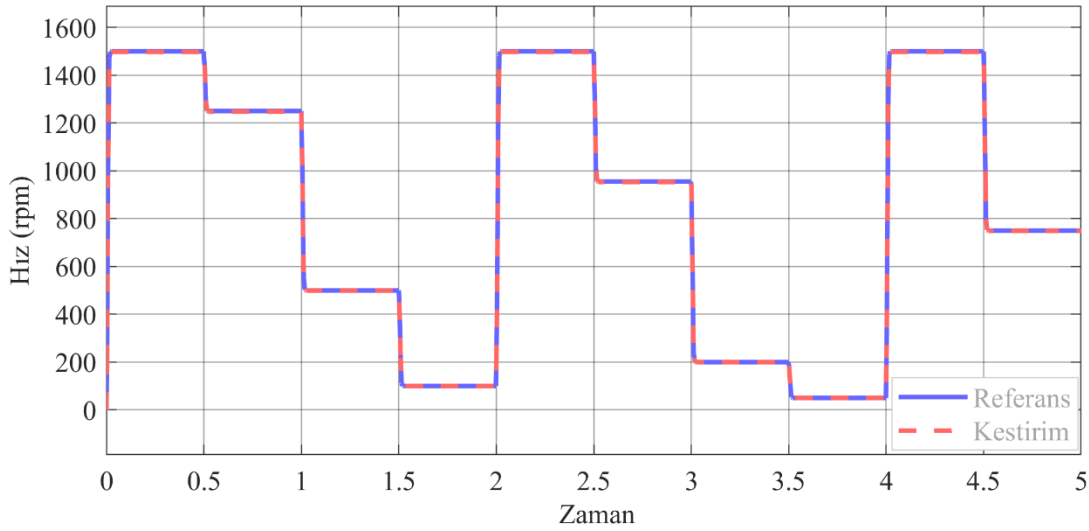
5. Benzetim Sonuçları (Simulation Results)

Bölüm 3 ve 4'te kapsamlı bir şekilde ifade edilen algılayıcısız skaler hız denetim yöntemi MATLAB/Simulink üzerinde programlanmış ve sistemin Simulink modeli Şekil 4'te verilmiştir. Önerilen akı ve kayma frekansı gözleyicili algılayıcısız skaler hız denetimi yönteminin başarımını test etmek için asenkron motor beş farklı referans hız değeri için test edilmiş ve test sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Bunun yanı sıra önerilen sistemin ani hız değişimlerine karşı başarımı da Şekil 6'da verilmiştir. Referans hızlar önerilen algoritmanın düşük, orta ve yüksek hızlardaki kestirim sonuçlarının daha iyi irdelenebilmesi için geniş bir aralıkta seçilmiştir.

Kestirim işleminin farklı referans hızlarda başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği Şekil 5'te görülebilmektedir. Görsel karşılaştırmada tatmin edici sonuçlar alınmasına rağmen önerilen yöntemin farklı referans hızlardaki başarısının nicel olarak da kıyaslanabilmesi için kestirim hataları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Hız Kestirim Hatası

Referans Hız (rpm)	Kestirilen Hız (rpm)	Kestirim Hatası (rpm)	Kestirim Hatası (%)
50	50,084	0.084	0.168
500	500.6732	0.6732	0.134
750	751.006	1.006	0.134
1000	1001.344	1.344	0.134
1500	1502.015	2.015	0.134
3000	2995.072	4.028	0.1642



Şekil 6. Hız Değişimlerine Karşı Kestirim Sonuçları (Estimation Results for Speed Changes)

6. Sonuç (Conclusion)

Günümüz endüstriyel uygulamalarında büyük bir kullanım alanına sahip olan asenkron motorların geniş bir aralıkta, yüksek verimlilikte hız denetiminin yapılabilmesi için motorun hız ve konum bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Geleneksel denetim yöntemlerinde hız ve konum bilgisi motor miline yerleştirilen bir hız algılayıcısı yardımı ile belirlenmektedir. Fakat kullanılan hız algılayıcısının sisteme ek olarak maliyet oluşturmasının yanında arızalanma riskinin de yüksek olması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için motorun kolayca okunabilen stator akım ve gerilimleri kullanılarak motorun hızını ve konumunu kestirebilen gözleyicilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada asenkron motorun algılayıcısız skaler denetimi için akı ve kayma frekansı gözleyicisi önerilmiştir. Önerilen gözleyici asenkron motorun kolayca ölçülebilen akım ve gerilimlerini kullanarak motorun anlık hızını kestirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın önceki bölümlerinde kapsamlı olarak matematiksel eşitlikleri verilen akı ve kayma gözleyicisi ile birlikte skaler denetim yönteminin MATLAB/Simulink ortamında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Önerilen gözleyici ve hız denetim yönteminin başarımını daha iyi irdelemek için düşük, orta ve yüksek hız bölgelerinde referans hız değerleri verilmiş, gözleyicilerin oldukça düşük hatalar ile motor hızını kestirebildiği görülmüştür.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Adiuku, C. O., Beig, A. R., Kanukollu, S. (2015). Sensorless closed loop V/f control of medium-voltage high-power induction motor with synchronized space vector PWM. 2015 IEEE 8th GCC Conference & Exhibition.
- Aydeniz, M. G. (2005). Asenkron motorların hız algılayıcısız kontrolünde yeni bir algoritmanın geliştirilmesi ve uygulaması. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bakan, A.F. (2002). Asenkron motorda doğrudan moment kontrolünün incelenmesi. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Batık, Z., Kaçar, S., Çavuşoğlu, Ü., Akgül, A., & Sevin, A. (2014). Kontrolör Tasarımı için GA Kullanıldığı MATLAB ve. NET Tabanlı Bir Windows Uygulaması. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 2(1), 24-34.
- Bingöl, O. Üç-Seviyeli Evirici ile Bir Asenkron Motorun Bulanık Mantık Tabanlı Vektör Kontrolü. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(3), 452-459.
- Bonanno C. J., Zhen L., Xu L. (1995). A direct field oriented induction machine drive with robust flux estimator for position sensorless control. IEEE-IAS Annu. Meeting, 1995.
- Burns, R.S. (2001). Advanced Control Engineering, Butterworth-Heinemann, USA.
- Chen B., Yao W., Lu Z., Lee K. (2014). A novel stator flux oriented V/f control method in sensorless induction motor drives for accuracy improvement and oscillation suppression. 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.
- Çakır A., Çalış H., Ayrılmış A., Kızıl A. (2009). Üç fazlı asenkron motorun sabit oranlı kapalı döngü hız denetimi. 5. Uluslar Arası Teknoloji Sempozyumu.
- Çukur, R. (2015). Vektör Denetim Yönteminde İki Farklı Hız Gözlemcisinin Karşılaştırılması Ve Motor Parametrelerindeki Değişimlerin Denetim Performansına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dere, H.K. (2012). Asenkron motorlarda stator direnç kestirimi ile sensörsüz hız kontrolü. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Diaz, A., Saltares, R., Rodriguez, C., Nunez, R. F., Ortiz-Rivera, E. I., & Gonzalez-Llorente, J. (2009, May). Induction motor equivalent circuit for dynamic simulation. In 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (pp. 858-863). IEEE.
- Dokur, E., Yüzgeç, U., Kurban M. (2021). Performance Comparison of Hybrid Neuro-Fuzzy Models Using Meta-Heuristic Algorithms for Short-Term Wind Speed Forecasting
- Gülbağçe, M.O, Nak, H., Kocabaş, D.A. (2013). Design of a mechanical load simulator having an excitation current controlled eddy current brake. 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, 1-5, IEEE.
- Küllaç Ö. (2011). Asenkron motorlarda yapay zeka teknikleri kullanılarak hız kontrol tekniklerinin modellenmesi ve optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Otkun, Özcan (2020). Scalar speed control of induction motors with difference frequency. Politeknik Dergisi.
- Okta S. (2009). Ac motorların gözlemleyici ile vektör denetimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Peng F. Z., Fukao T. (1994). Robust speed identification for speed-sensorless vector control of induction motors. IEEE Trans. Ind. Applicat., 1994.
- Schauder C. (1992). Adaptive speed identification for vector control of iduction motors without rotational transducers. IEEE Trans. Ind. Applicat., 1992.
- Sun, D., Xue, H. (2014). Speed sensorless control system of induction motor. Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics Vol. 2.
- Vatansever, F., Deniz, S. (2013) Genetik Algoritma Tabanlı PID Kontrolör Simülasyonu Tasarımı. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 18(2), 7-18.
- Wang, C. C., Fang, C. H. (2003). Sensorless scalar-controlled induction motor drives with modified flux observer. IEEE Transactions on Energy Conversion 2003.
- Zerdali E. (2016). Asenkron motor kontrolü için yapay zeka tabanlı algoritmaların geliştirilmesi ve gerçek zamanlı uygulamaları. Doktora Tezi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zhang, Z., Bazzi, A.M. (2019). Robust sensorless scalar control of induction motor drives with torque capability enhancement at low speeds. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) (pp. 1760-1770).
- Zorlu, S., Mergen, F. (2000) Elektrik Makineleri 2 Asenkron Makineler, Birsen Yayınevi.



THE SPATIAL ANALYSIS OF b-VALUES OF THE AREA BETWEEN BODRUM AND FETHİYE DISTRICTS, THE SOUTH-WESTERN ANATOLIA, TURKEY

Fahriye AKAR^{1*}, Mehveş Feyza AKKOYUNLU², Funda BİLİM³

¹ Erzincan Binali Yıldırım University, Central Vocational School, Department of Construction Technology, Erzincan, Türkiye

² Boğaziçi University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Department of Earthquake Engineering, İstanbul, Türkiye

³ Sivas Cumhuriyet University, Engineering Faculty, Department of Geophysical Engineering, Sivas, Türkiye

Keywords

Guttenberg-Richter Relationship, b-value, Seismic Hazard, The Maximum Likelihood Method.

Abstract

The estimation of the variation of the b-value, which is frequency distribution of a magnitude given in an earthquake data set of any region, is important parameter for interpretation of tectonic mechanism and seismic hazard assessment of that region. There is an inverse correlation between stress and b-value. The magnitude-frequency relationship is described by the well-known the Gutenberg-Richter relationship. The purpose of this paper is to investigate the recent seismicity of the region between the Bodrum and Fethiye, the south-western Anatolia in Turkey. A total of 27357 earthquake data is taken into account in this study in the period between 2004 to 2020 with magnitude (M_I) larger than 2. The majority of focal depths of earthquakes are concentrated between 0 and 33 km. The b-value in the Gutenberg-Richter relationship was estimated by the maximum likelihood method in this study. The estimated b-values range between 0.5 and 2 in the study region. While the lower b-values (0.5-1) are located at the SE of the study area (mainly the Beydağları unit), higher values (1-2) are trending on the west-east direction along the fault zones. The highest b-values in the study area are possibly related with the brittle lower-mid crust, thermal regime, normal faults and young basins bounded by these faults.

BODRUM VE FETHİYE İLÇELERİ ARASINDAKİ BÖLGENİN b-DEĞERLERİNİN UZAYSAL ANALİZİ, GÜNEYBATI ANADOLU, TÜRKİYE

Anahtar Kelimeler

Gutenberg-Richter ilişkisi, b-değeri, Sismik Tehlike, Maksimum Likelihood Yöntemi.

Öz

Herhangi bir bölgenin deprem veri setinde verilen bir büyüklüğün frekans dağılımı olan b-değerinin değişiminin tahmini, o bölgenin tektonik mekanizmasının yorumlanması ve sismik tehlike değerlendirmesi için önemli bir parametredir. Gerilme ile b-değeri arasında ters korelasyon bulunmaktadır. Magnitüd-frekans ilişkisi, iyi bilinen Gutenberg-Richter ilişkisi ile tanımlanır. Bu makalenin amacı, Bodrum ve Fethiye ilçeleri arasındaki bölgenin (GB Anadolu, Türkiye) yakın zamandaki sismisitesini araştırmaktır. Bu çalışmada 2004-2020 yılları arasında magnitüdü (M_I) 2'den büyük toplam 27357 deprem verisi kullanılmıştır. Depremlerin büyük çoğunluğunun odak derinlikleri 0 ile 33 km arasında yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmada, Gutenberg-Richter ilişkisindeki b-değeri, maksimum likelihood yöntemiyle hesaplanmıştır. Hesaplanan b-değerleri çalışma bölgesinde 0.5 ile 2 arasında değişmektedir. Daha düşük b değerleri (0.5-1) çalışma alanının GD'sunda (esas olarak Beydağları birimi) yer alırken, batı-doğu yönelimli yüksek değerler (1-2) fay zonları boyunca yer almaktadır. Çalışma alanındaki en yüksek b değerleri muhtemelen kırılğan alt-orta kabuk, termal rejim, normal faylar ve bu faylarla sınırlanan genç havzalarla ilgilidir.

Alıntı / Cite

Akar, F., Akkoyunlu, M.F., Bilim, F., (2022). The Spatial Analysis Of B-Values Of The Area Between Bodrum and Fethiye Districts, The South-Western Anatolia, Turkey, Journal of Engineering Sciences and Design, 9(1), 238-246.

* İlgili yazar / Corresponding author: fahriyeakar@erzincan.edu.tr , +90-446-226-6602

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
F. Akar, 0000-0002-8445-0353	Başvuru Tarihi / Submission Date	15.08.2021
M.F. Akkoyunlu, 0000-0002-4966-8218	Revizyon Tarihi / Revision Date	26.11.2021
F. Bilim, 0000-0003-1098-4755	Kabul Tarihi / Accepted Date	01.12.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Introduction

The Western Anatolia is characterized by a very complex geology, high seismic activities, and several tectonic zones due to the deformation of the northern margin of the Anatolide-Tauride Block during the Alpine orogeny. The study area is located at the south western Anatolia, where it is one of the most seismically active region (Figure 1a). Numerous earthquakes have occurred during the historical and instrumental periods in this region. Some moderate and large earthquakes have been investigated by several researchers for determining the fault mechanism and the source parameters of the mainshock (e.g., Ambraseys and White, 1997; Hall et al., 2014; Yolsal-Çevikbilen et al., 2014; Karasözen et al., 2016; Konca et al., 2019; Ganas et al., 2020).

In the study area, the latest strong even occurred on July 20, 2017 (the Gulf of Gökova), with a magnitude of $M_w=6.6$ (USGS). Konca et al. (2019) proposed that the Gokova earthquake ruptured a north-dipping fault and occurred on a 20-25 km long, E-W striking, 40° north-dipping, pure normal fault with the largest slip exceeding 2 m between 4 km and 10 km depths. Ganas et al. (2020) determined also the dip-direction of the fault plane as north-dipping with an angle of $37^\circ \pm 3^\circ$. Yolsal-Çevikbilen et al. (2014) investigated the Gulf of Gökova earthquakes occurred at 1986-2005 ($M_w \geq 5.0$) and concluded that the EW- trending high-angle normal faulting mechanisms reveal extensional tectonics in the Gulf of Gokova. In the study region, the other important structural element is the Fethiye-Burdur Fault Zone (Figure 1a) that is composed of several NE-SW striking active faults (Hall et al., 2014). A devastating earthquake in Fethiye occurred on April 25, 1957 ($M_w=7.1$), which was connected with the rupture of a left lateral strike-slip fault (Tan et al., 2008). Över et al. (2016) investigated to the regional stress regime in SW Anatolia in detail by using fault kinematic analysis and inversion of focal mechanisms of shallow earthquakes occurring between 2001 and 2015 along the Fethiye-Burdur Fault zone and its surroundings. They determined that a normal faulting stress regime is a NE-SW trending σ_3 axis for the Fethiye-Demre zone.

In the study area and its surroundings, studies mostly focused on the determination of earthquake focal mechanism. But, the regional and temporal variations of seismicity studies are few and covered whole western Anatolia. For example, Bayrak and Bayrak (2012) and Öztürk (2015) studied the correlations between seismotectonic b -value and D_c -value in the western Anatolia. Recently, Bayrak et al. (2017) determined the temporal and spatial variations of Gutenberg-Richter parameter (b) and fractal dimensions (D_c) using the earthquakes with magnitude $2.0 \leq M_s \leq 7.7$ between 1900 and 2010 for whole western Anatolia. Çoban and Sayıl (2019) investigated the Bodrum-Kos earthquake (21 July 2017, $M_w=6.5$) and calculated the Weibull, gamma, log-normal, and Rayleigh distribution models parameters by using the inner-event time of earthquake recurrences. They proposed that the conditional probability results contribute to seismic hazard assessment in the western Anatolia. Mesimeri et al. (2018) investigated the earthquake swarm near the Aegean coast of NW Turkey and suggested that the earthquake swarm is most probably connected with minor faults accommodating moderate earthquakes ($M \sim 5$).

In quantitative seismicity analysis, the b -parameter related with the Gutenberg-Richter frequency-magnitude relation is important to identify seismicity properties of any region (Gutenberg and Richter, 1944). The scope of this study is to determine b and M_c values and form the b -map of the study area using the earthquake data set between the periods of 2004-2020 with magnitude- $M_l \geq 2.0$ for future earthquake potential occurrences.

2. Simplified tectonic and geologic setting

The Anatolian Plate has been rotating counter clockwise and moving westwards by lateral extrusion along the North Anatolia and East Anatolia Fault Zones (NAFZ, EAFZ, respectively) at a rate of 30-40 mm/year since about 5 Ma, as a result of the collision of Africa- Arabia and Eurasia plates along the Bitlis-Zagros Suture Zone (McKenzie, 1972; Şengör and Yılmaz, 1981; Le Pichon et al., 1995; McClusky et al., 2000) (Figure 1a). The west-southwestward escape of the Anatolian plate along the NAFZ and EAFZ has been postulated as one of the cause of the N-S extension of western Anatolia (e.g., Şengör and Yılmaz, 1981). This extensional phase produced the several low/high-angle faults controlling the western Anatolia graben systems (e.g., Alaşehir, Büyük Menderes, Küçük Menderes).

There are two main faults in the study area (Figure 1b). The Datça-Kale main breakaway fault is associated with the exhumation as an asymmetric core complex of the Menderes Massif (Seyitoğlu et al., 2004). The Fethiye-Burdur fault zone is developed within a NE-SW trending left-lateral shear zone (Akyüz and Altunel, 2001; Karabacak,

2011; Elitez and Yaltırak, 2016; Elitez et al., 2016, 2017). In this fault zone, a recent large earthquake was occurred on 25 April 1957 (Magnitude=7.1, Fethiye earthquake) (Ambraseys, 1989).

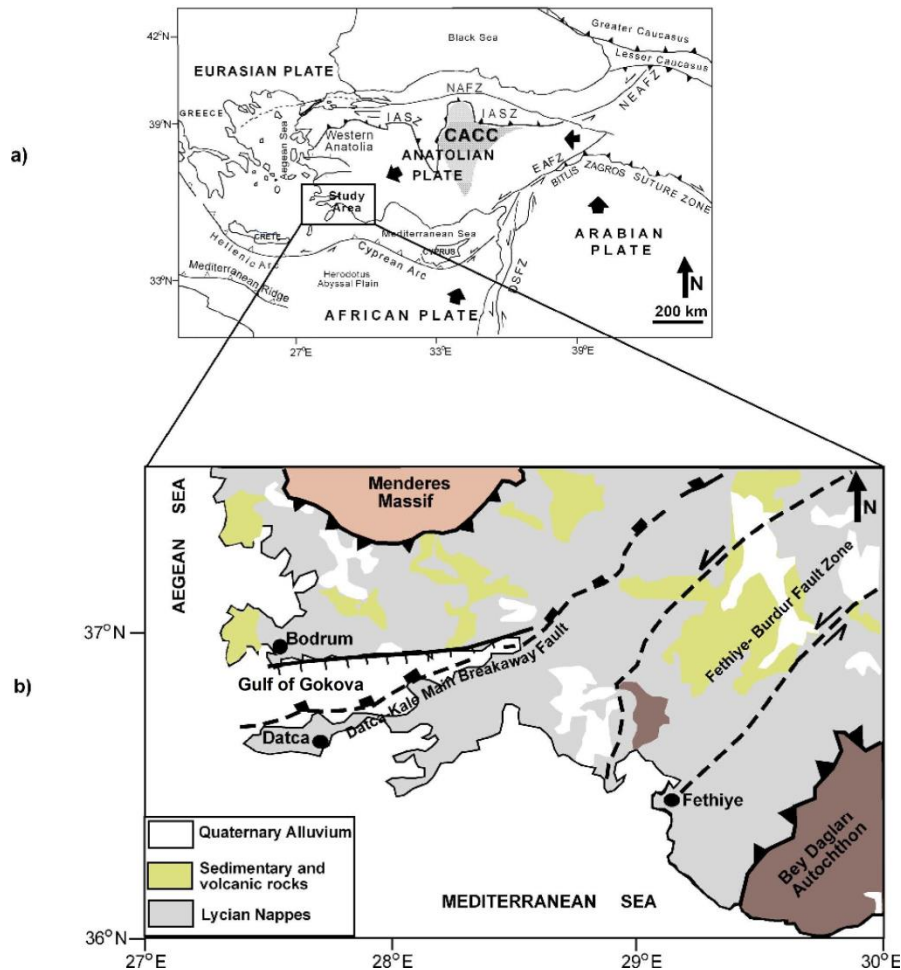


Figure 1. a) The major tectonic elements of Turkey (modified from Bozkurt and Mittwede, 2005). The large arrows show relative motions of the Anatolian Block and convergent motions of the African Plate and Arabian Platform. NAFZ: North Anatolian Fault Zone, DSFZ: Dead Sea Fault Zone, NEAFZ: North-East Anatolian Fault Zone, EAFZ: East Anatolian Fault Zone, IASZ: Izmir-Ankara-Erzincan Suture Zone. **b)** Simplified geological map of the study area (modified from Çemen et al. 2014)

The study area is mostly covered with the Lycian Nappes, lied between the Menderes Massif and the Bey Dağları Autochthon (Figure 1b). The Lycian Nappes consists of thrust sheets (nappes piles) of Paleozoic-Cenozoic rocks, ophiolitic and tectonic melanges and serpentinized peridotites (Collins and Robertson, 1997; Özer et al., 2017). The Lycian allochthon is thrust over autochthonous, unmetamorphosed, platform sediments of the Bey Dağları unit (Collins and Robertson, 1998). The southern part of the Menderes Massif is located in the north-west of the study area and bordered on the south by the Lycian Nappes (Figure 1b). It is covered with the augen gneisses of the core series (Hetzl et al., 1998).

3. Data and Method

In this study, an updated catalog of 27357 earthquakes with a magnitude $M_l \geq 2.0$ between 2004 and 2020 is used. The data are obtained from the Bogazici University Kandilli Observatory and Research Institute Regional Tsunami-Earthquake Monitoring Center of Turkey (KOERI-RETMC). The study area is within 36°N to 37.5°N and 27°E to 30°E (Figure 2a). The magnitude scale (M_d) calculated from duration was converted to local magnitude to ensure magnitude homogeneity. We used the following empirical relations for the conversion (Kalafat et al., 2011) $M_d = 1.0377 + 0.7863M_s$ and $M_l = 1.0553 + 0.7782M_s$.

The magnitude (M_l) of total 23161 events ranges between 2 and 3. There are 3911 events within magnitude (M_l) range between 3-4. The magnitude of 259 events is between 4 and 5. The magnitude of 24 events range between 5 and 6. The W-E vertical cross section of the hypocenter distribution of earthquakes indicates that they are mostly concentrated around 33 km (Figure 2b). The study area is characterized by low magnitude and shallow depth in

general. There are 26620 events up to 33 km. Only 737 events have a depth of more than 33 km. It can be suggested that the depth of the seismogenic zone in the study region is about 33 km depth. In earthquake sequences, the main shocks are independent events. Foreshock and aftershocks are dependent events resulting from stress changes caused by the main shock. Dependent earthquakes should be declustered from earthquake catalogs. The process of distinguishing dependent and independent events from each other is called 'declustering' (e.g., Gardner and Knopoff, 1974). The decluster method (Gardner and Knopoff, 1974) is a window method that grouped earthquakes according to the space-time distances among them. For every cluster, the event with the maximum magnitude was indicated as the mainshock and events within the space-time window of the mainshock were removed. 15939 earthquakes remained after the elimination of deep earthquakes and declustering.

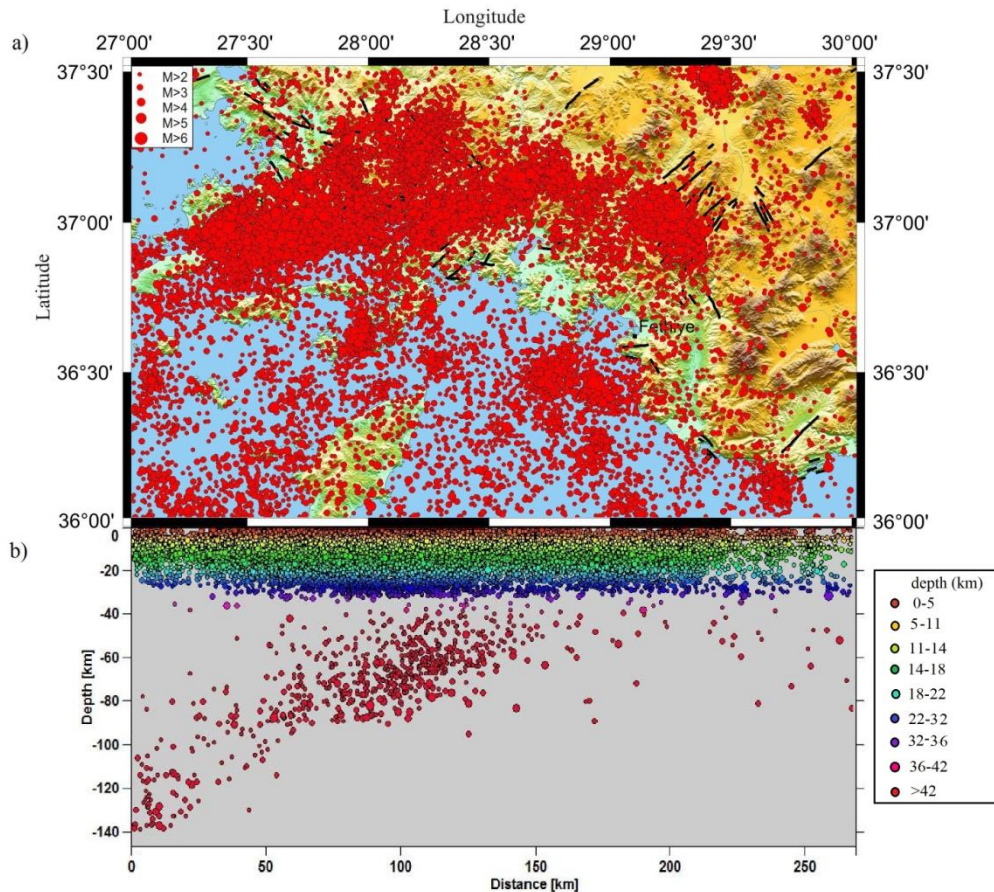


Figure 2. a) Map of epicenters of earthquakes with $M_l \geq 2.0$ between 2004 and 2020 occurred in the study region. b) the hypocentral depths of earthquakes

Figure 3 shows the time histogram for the study region between 2004 and 2020. The number of earthquakes does not change much over years, except for those occurred between 2012 and 2014, and between 2017 and 2018. 3000 events were recorded between 2017 and 2018 (Figure 3).

The b-value is an important parameter that can be related to the crustal stress conditions and has been used effectively since 1940s to investigate seismicity of a region (e.g., Gutenberg and Richter, 1944; Scholz, 1968; Wiemer and Benoit, 1996; Enescu and Ito, 2002; Sayıl and Osmanoğlu, 2008; Roy et al., 2011; Mesimeri et al., 2018; Özer et al., 2018; Çoban and Sayıl, 2019; Chorozoglou and Papadimitriou, 2019; Çoban and Sayıl, 2020; Taroni and Akinci, 2021). The b-value is related with the crustal heterogeneity, earthquake occurrence and volcanic activity of a region.

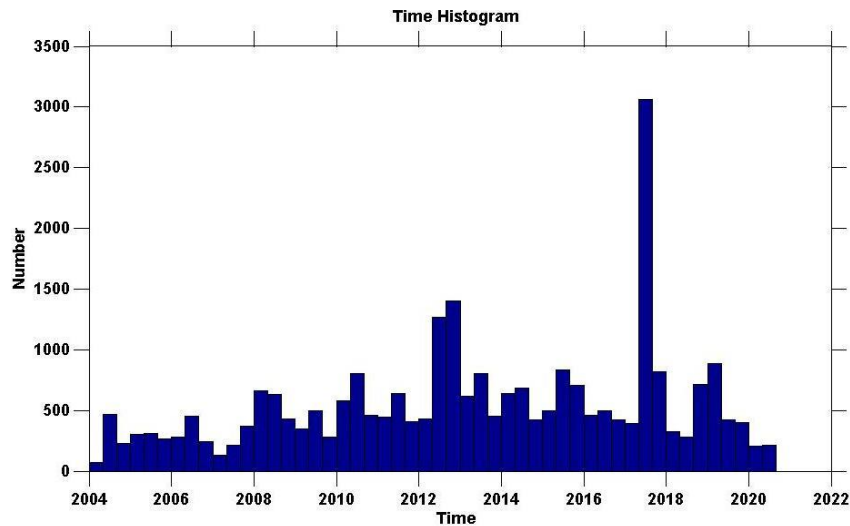


Figure 3. The time histogram for the study region between 2004 and 2020

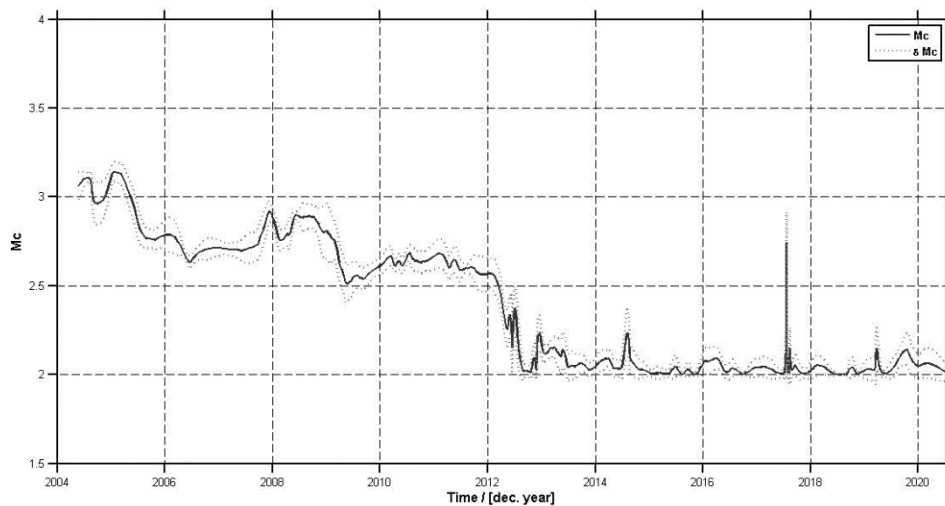


Figure 4. The variation of the M_c , from 2004 to 2020 in the study region. Standart deviation (δM_c) of the completeness is plotted with dash line. M_c is illustrated with overlapping samples and each sample contains 250 events

We used the ZMAP software package (Wiemer, 2001) for determining the b -value and its spatial variations from maximum likelihood method (Aki, 1965; Utsu, 1999). According to Aki (1965) and Utsu (1999), b -value depends on the magnitude completeness (M_c). Therefore, firstly, we calculated the magnitude of completeness (M_c). Figure 4 shows the distribution of M_c values with time. M_c value was determined by maximum curvature method in the ZMAP software. The magnitude corresponding to the point of the maximum curvature deviating from Gutenberg-Richter law is considered as M_c , as the magnitude connecting to the linear cumulative part of a log linear frequency magnitude distribution (Wiemer and Wyss 2000; Zhou et al. 2018). The b -value can be estimated by using the maximum likelihood equation (Aki, 1965; Utsu, 1999), $b = \log_{10} e / (M_m - (M_c - \Delta m / 2))$. M_m is the mean of the magnitudes that are larger than M_c ; Δm is the width of the magnitude bin, commonly chosen to be 0.1. In this case, $b = \text{Log}_{10}(e) / [M_m - (M_c - 0.05)]$. Figure 5 shows the maximum likelihood solution of the frequency-magnitude distribution for the study area. The line represents the Gutenberg-Richter equation fit. M_c and M_m values were selected as 2.1 and 4.1, respectively. The vertical axis shows the cumulative earthquake occurrence number (logarithmic) versus magnitude (Figure 5). To form the b -map of the study region, the region is divided into $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ grids. The b -map of the study region is given in Figure 6.

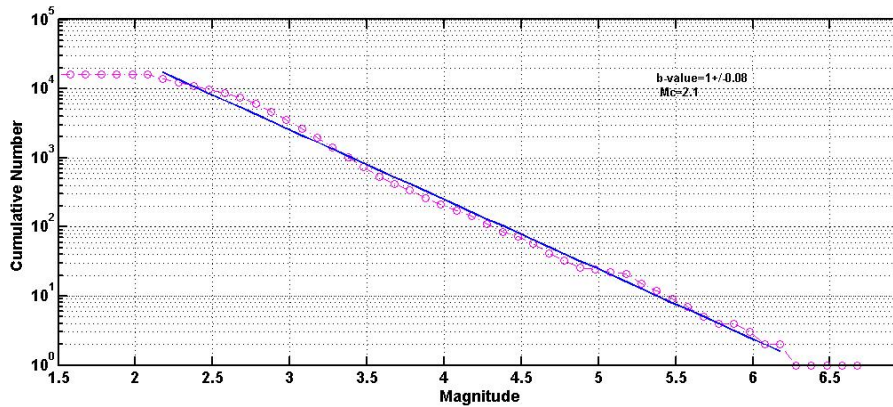


Figure 5. Gutenberg-Richter relationships, b and M_c -values of the study region for all earthquakes from 2004 to 2020. The solid line is the best fit with respect to the least-squares method

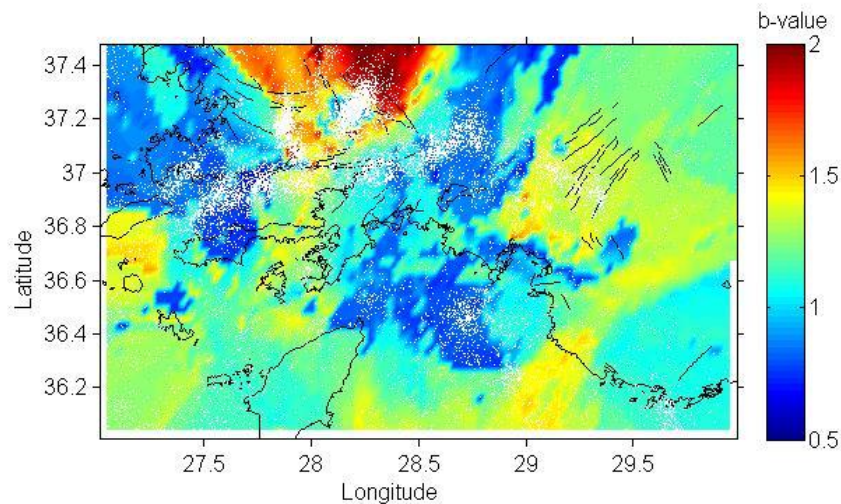


Figure 6. Regional distribution of b -value for the study region. White dots are earthquakes.

4. Result and Discussion

The variation of b -values of the region between Bodrum and Fethiye (SW Anatolia) was determined by using the maximum likelihood method based on the earthquake catalog from 2004 to 2020. The earthquakes in the study region are mostly shallow and of low magnitude. The b values can reflect the stress level of the study region. The variation of b values displays the heterogeneity of earth. The recent seismicity of the study region (Figure 2a) seems mainly concentrating on the EW-trending along the Gulf of Gökova, related to the normal faults that can be resulted from N-S extension of the region and along the NE-SW trending Datça-Kale main breakaway fault (Figure 1b). Seyitoğlu et al. (2004) suggested that the fill of the Kale and Gökova basins, the Lycian ophiolites and the cover rocks of the Menderes massif are composed of the upper plate rocks of the large main breakaway. The low seismicity is mainly observed the Beydağları autochthon unit and the east of the study area (Figure 1b, Figure 2a). The west of the study area is a more active region than the east and south east (Figure 2a). The hypocentral depths of the earthquakes range between about 5 km and 140 km (Figure 2b). The distributions of deep-events (Figure 2b) are observed along the subducting slabs where the Aegean plate can easily override the subducting edge of the African plate (e.g., McKenzie, 1972). Although focal depths reach up to 140 km (Figure 2b), most of the earthquake focal depths range between 5-33 km. It can be suggested that the depth of the seismogenic zone in the study region is about 33 km.

Ateş et al. (2012) estimated the crustal thickness of western Anatolia of 26-34 km from gravity data. Kind et al. (2015) suggested that the crustal thickness increases from the Aegean to Eastern Anatolia from 2-5 to 40 km. Saunders et al. (1998) calculated a crustal thickness of 30 km for western Anatolia. Akyol et al. (2006) determined the depth of the Moho and the velocity of upper mantle is 29 km and 7.8 km s^{-1} , respectively. Endrun et al. (2008) determined an average moho depth of 28 km and low S velocities ($<4 \text{ km s}^{-1}$) by analysis of Rayleigh wave fundamental mode dispersion measurements for the Aegean region. The 33 km depth chosen in this study is consistent with previous studies in the region.

In the study region, the earthquakes occurred on between 2004 and 2020 take place mainly at middle and lower crust (Figure 2b). According to the time histogram (Figure 3), it can be seen that the number of microearthquakes has increased especially in recent years. It is observed that the change of M_c is almost constant after the year of 2012 (Figure 4). M_c was calculated as 2.1 for the study region (Figure 5). For M_c values between 1.2 and 2.2, the estimated b value is about constant (Wiemer and Wyss, 2002).

We estimated that the b -values varies between 0.5 and 2 (Figure 6). It is found that the values increase from west to east except the Beydağları autochthon unit where exhibits the moderate values (about 0.8-1.25). Bayrak and Bayrak (2012) estimated the b -value as 0.80-0.89 using earthquake data from 1974 to 2010 in the SE of the study area. Our results are consistent with their result in the Beydağları autochthon unit. The north of the Beydağları unit is bounded by the major thrust fault (Figure 1b). Our b -value results are in a good agreement with the P-wave travel time tomography results of Biryol et al. (2011) who estimated the slow velocity perturbations ($\delta V_p \approx -1.4$ per cent) in there. Tezel et al. (2013) investigated the moho depth and shear wave velocity of Turkey by using the teleseismic receiver function method. They determined that the depth of moho is between 28 and 38 km in the southwestern Anatolia and the uppermost mantle S-wave velocity is between 4.1 and 4.4 km s⁻¹. They suggested that the low velocity zone is located at between 15 km and 30 km in SW Turkey, where it may be related with molten or hot upper mantle material. Al-Lazki et al. (2004) estimated the very low Pn velocity (about 7.5 km s⁻¹) in SW Turkey. Our results indicate that the Beydağları unit exhibits low- b values, low earthquake activity, low seismic velocity, moderate Curie point depth (16-19 km, Dolmaz et al., 2005). Lower values (<1) are observed in the region between two fault zones (the center of the study area, Figure 6). Sayıl (2014) found a crustal P and S wave velocity of 6.3 km s⁻¹ and 3.63 km s⁻¹, respectively at 10 km for western Turkey using surface wave discrimination. The low velocities may be associated with a hot crust in the western Turkey. Endrun et al. (2008) found low S wave velocities in the northern Aegean moho by using surface wave dispersion. They also calculated that the northern Aegean moho is located at a shallow depth of around 28-30 km.

The Gulf of Gökova exhibits the moderate/high b -values (1-1.3) that can be related with the high seismic activity. Sayıl and Osmaşahin (2008) investigated the seismicity of western Anatolia and determined the high b values around the Gulf of Gökova -Muğla by using Gutenberg-Richter method. The high b -values (>1.5) are shown on the land of the study area (Figure 6) where may be related with the different stress level and faulting type. The high b -values (Figure 6) are observed at the north of the study area where it correlates with the south of Menderes Massif and along onland Fethiye-Burdur Fault Zone. Mogi (1962) suggested that the high b -values may be sign of the lower stress and more heterogeneous state of the crust. It can be concluded from Figure 6 that while the normal faults may exhibit high b -values, the thrust fault may exhibit low b -values. The b -value can be correlated with the heat flow in the study region. Dolmaz et al. (2005) estimated the high heat flow values (80 to 100 mW m⁻²) in SW Anatolia from spectral analysis of magnetic anomalies. In this study, the comparison of the NW-SE trending high b -values and heat flow shows that while the b -values increase the heat flow values increase. Wiemer and Wyss (2002) suggested that geothermal areas may induce high- b -values. We suggest that the estimated high b -values can be associated with both a high temperature and active fault zones in the study area and active tectonic zone is located at moderate and lower crust weakened by crustal thickening, N-S extensional regime and geothermal mechanism.

Acknowledgement

The authors thank the Bogazici University Kandilli Observatory and Research Institute National Earthquake Monitoring Center of Turkey (KOERI-NEMC) for earthquake data. We also thank the Editor and two anonymous reviewers for comments and suggestions and improvement of the original manuscript.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

- Aki, K., 1965. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. Bulletin of the Earthquake Research Institute (University of Tokyo), 43, 237-239.
- Akyol, N., Zhu L., Mitchell, B.J., Sozbilir, H., Kekovali, K., 2006. Crustal structure and local seismicity in western Anatolia. Geophysical Journal International, 166, 1259-1269.
- Akyüz, H.S., Altunel E., 2001. Geological and archaeological evidence for post-Roman earthquake surface faulting at Cibyra, SW Turkey. Geodinamica Acta, 14, 95-101.
- Al-Lazki, A.I., Sandvol, E., Seber, D., Barazangi, M., Turkelli, N., Mohamad, R., 2004. Pn tomographic imaging of mantle lid velocity and anisotropy at the junction of the Arabian, Eurasian and African plates. Geophysical Journal International 158, 1024-1040.

- Ambraseys, N.N., White, D., 1997. The seismicity of the eastern Mediterranean region 550-1 BC: a re-appraisal. *Journal Earthquake Engineering*, 1, 603-632.
- Ambraseysi, NN., 1989. Temporary seismic quiescence: SE Turkey. *Geophysical Journal*, 96, 311-331.
- Ateş, A., Bilim, F., Büyüksaraç, A., Aydemir, A., 2012. Crustal structure of Turkey from aeromagnetic, gravity and deep seismic reflection data. *Surveys in Geophysics*, 33, 869-885.
- Bayrak, E., Yilmaz, S., Bayrak, Y., 2017. Temporal and spatial variations of Gutenberg-Richter parameter and fractal dimension in western Anatolia, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138, 1-11.
- Bayrak, Y., Bayrak, E., 2012. An evaluation of earthquake hazard potential for different regions in western Anatolia using the historical and instrumental earthquake data. *Pure and Applied Geophysics*, 169, 1859-1873.
- Biryol, C.B., Beck, S.L., Zandt, G., Ozacar, A.A., 2011. Segmented African lithosphere beneath the Anatolian region inferred from teleseismic P-wave tomography. *Geophysical Journal International*, 184, 1037-1057.
- Bozkurt, E., Mittweide, S.K., 2005. Introduction: evolution of continental extensional tectonics of western Turkey. *Geodinamica Acta*, 18, 153-165.
- Chorozoglou, D., Papadimitriou, E., 2019. Monitoring earthquake network measures between main shocks in Greece. *Journal of Seismology*, 23, 505-519.
- Çemen, I., Helvacı, C., Yalçın, Ersoy, E., 2014. Cenozoic extensional tectonics in western and central Anatolia, Turkey: Introduction. *Tectonophysics*, 635, 1-5.
- Çoban, K.H., Sayıl, N., 2019. Evaluation of earthquake recurrences with different distribution models in western Anatolia. *Journal of Seismology*, 23, 1405-1422.
- Çoban, K.H., Sayıl, N., 2020. Conditional probabilities of Hellenic Arc earthquakes based on different distribution models. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 5133-5145.
- Collins, A.S., Robertson, A.H.F., 1997. The Lycian Melange, south-west Turkey: an emplaced accretionary complex. *Geology*, 25, 255-258.
- Collins, A.S., Robertson, A.H.F., 1998. Processes of Late Cretaceous to Late Miocene episodic thrust-sheet translation in the Lycian Taurides, SW Turkey. *Journal of Geological Society*, 155, 759-772.
- Dolmaz, M.N., Hisarlı, Z.M., Ustaomer, T., Orbay, N., 2005. Curie point depths based on spectrum analysis of aeromagnetic data, west Anatolian extensional province, Turkey. *Pure and Applied Geophysics*, 162, 571-590.
- Elitez, I., Yaltırak, C., 2016. Miocene to Quaternary tectonostratigraphic evolution of the middle section of the Burdur-Fethiye Shear Zone, south-western Turkey: Implications for the wide inter-plate shear zones. *Tectonophysics*, 690, 336-354.
- Elitez, I., Yaltırak, C., Aktug, B., 2016. Extensional and compressional regime driven left-lateral shear in southwestern Anatolia (eastern Mediterranean): The Burdur-Fethiye Shear Zone. *Tectonophysics*, 688, 26-35.
- Elitez, I., Yaltırak, C., Kurcer, A., Ozdemir, E., Guldogan, C.U., 2017. A critical review of the Kibyra fault (Burdur-Fethiye Shear Zone, SW Turkey). *Geodinamica Acta*, 29, 91-102.
- Endrun, B., Meier, T., Lebedev, S., Bohnhoff, M., Stavrakakis, G., Harjes, H.P., 2008. S velocity structure and radial anisotropy in the Aegean region from surface wave dispersion. *Geophysical Journal International*, 174, 593-616.
- Enescu, B., Ito, K., 2002. Spatial analysis of the frequency-magnitude distribution and decay rate of aftershock activity of the 2000 western Tottori earthquake. *Earth Planets Space*, 54, 847-859.
- Ganas, A., Elias, P., Kapetanidis, V., Valkaniotis, S., Briole, P., Kassaras, I., Argyrakı, P., Barberopoulou, A., Moshou, A., 2020. The July 20, 2017 Mw6.6 Kos Earthquake: Seismic and geodetic evidence for an active north-dipping normal fault at the western end of the Gulf of Gokova (SE Aegean Sea). *Pure and Applied Geophysics*, 176, 4177-4211.
- Gardner, J.K., Knopoff, L., 1974. Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed Poissonian? *Bulletin Seismological Society of America*, 64, 1363-1367.
- Gutenberg, B., Richter, C.F., 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin Seismological Society of America*, 34, 185-188.
- Hall, J., Aksu, A.E., Elitez, I., Yaltırak, C., Cıfci, G., 2014. The Fethiye-Burdur fault zone: A component of upper plate extension of the subduction transform edge propagator fault linking Hellenic and Cyprus Arcs, eastern Mediterranean. *Tectonophysics*, 635, 80-99.
- Hetzel, R., Romer, R.L., Candan, O., Passchier, C.W., 1998. Geology of the Bozdag area central Menderes massif, SW Turkey: Pan-African basement and Alpine deformation. *Geologische Rundschau*, 87, 394-406.
- Kalafat, D., Güneş, Y., Kekovalı, K., Kara, M., Deniz, P., Yılmaz, M., 2011. Bütünleştirilmiş homojen Türkiye deprem kataloğu (1900-2010; M \geq 4.0). Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, 643 sayfa.
- Karabacak, V., 2011. Geological, geomorphological and archaeoseismological observations along the Cıbyra fault and their implications for the regional tectonics of SW Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 20, 429-447.
- Karasözen, E., Nissen, E., Bergman, E.A., Johnson, K.L., Walters, R.J., 2016. Normal faulting in the Simav graben of western Turkey reassessed with calibrated earthquake relocations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 10.1002/2016JB012828.
- Kind, R., Eken, T., Tilmann, F., Soudoudi, F., Taymaz, T., Bulut, F., Yuan, X., Can, B., Schneider, F., 2015. Thickness of the lithosphere beneath Turkey and surroundings from S-receiver functions. *Solid Earth*, 6, 971-984.
- Konca, A.O., Guvercin, S.E., Ozarpacı, S., Ozdemir, A., Funning, G.J., Dogan, U., Ergintav, S., Floyd, M., Karabulut, H., Reilinger, R., 2019. Slip distribution of the 2017 Mw6.6 Bodrum-Kos earthquake: resolving the ambiguity of fault geometry. *Geophysical Journal International*, 219, 911-923.
- Le, Pichon, X., Chamonrooke, N., Lallemand, S., Noomen, R., Veis, G., 1995. Geodetic determination of the kinematics of central Greece with respect to Europe, implications for eastern Mediterranean tectonics. *Journal of Geophysical Research*, 100, 12675-12690.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksoz, M.N., Veis, G., 2000. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*, 105, 5695-5719.

- McKenzie, D., 1972. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 30, 109-185.
- Mesimeri, M., Kourouklas, C., Papadimitriou, E., Karakostas, V., Kementzetzidou, D., 2018. Analysis of microseismicity associated with the 2017 seismic swarm near the Aegean coast of NW Turkey. *Acta Geophysica*, 66, 479-495.
- Mogi, K., 1962. Magnitude-frequency relation for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes. *Bulletin of the Earthquake Research Institute University Tokyo*, 40, 831-853.
- Över, S., Özden, S., Pinar, A., Yilmaz, H., Kamaci, Z., Unlugenc, U.C., 2016. Late Cenozoic stress state distributions at the intersection of the Hellenic and Cyprus Arcs, SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 132,94-102.
- Özer, C., Gök, E., Polat, O., 2018. Three-dimensional seismic velocity structure of the Aegean region of Turkey from local earthquake tomography. *Annales Geophysicae* 61, 1-21.
- Özer, S., Gungor, T., Sari, B., Sagular, EK., Gormus, M., Ozkan-Ongen, I., 2017. Cretaceous rudist-bearing platform carbonates from the Lycian Nappes (SW Turkey): Rudist associations and depositional setting. *Cretaceous Research*, 79,122-145.
- Öztürk, S., 2015. A study on the correlations between seismotectonic b-value and Dc-value, and seismic quiescence Z-value in the western Anatolian region of Turkey. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 108, 172-184.
- Roy, S., Ghost, U., Hazra, S., Kayal, J.R., 2011. Fractal dimension and b-value mapping in the Andaman-Sumatra subduction zone. *Natural Hazards*, 57,27-37.
- Saunders, P., Priestley, K., Taymaz, T., 1998. Variations in the crustal structure beneath western Turkey. *Geophysical Journal International*, 134,373-389.
- Sayıl, N., 2014. Determination of the crust and upper-mantle structure in Anatolia by surface wave data. *Natural Science*, 6, 968-977.
- Sayıl, N., Osmañahin, İ., 2008. An investigation of seismicity for western Anatolia. *Natural Hazards*. 10.1007/s11069-007-9141-2.
- Scholz, C.H., 1968. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquake. *Bulletin Seismological Society of America*, 58, 399-415.
- Seyitoğlu, G., Isık, V., Cemen, I., 2004. Complete Tertiary exhumation history of the Menderes massif, western Turkey: an alternative working hypothesis. *Terra Nova*, 16,358-364.
- Şengör, AMC., Yilmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75,181-241.
- Tan, O., Tapirdamaz, M.C., Yoruk, A., 2008. The earthquake catalogues for Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17,405-418.
- Taroni, M., Akinci, A., 2021. Good practices in PSHA: declustering, b-value estimation, foreshocks and aftershocks inclusion; a case study in Italy. *Geophysical Journal International*, 224,1175-1188.
- Tezel, T., Shibutani, T., Kaypak, B., 2013. Crustal thickness of Turkey determined by receiver function. *Journal of Asian Earth Sciences*, 75,36-45.
- Utsu, T., 1999. Representation and analysis of the earthquake size distribution: A historical review and some new approaches. *Pure and Applied Geophysics*, 155,509-535.
- Wiemer, S., 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72, 373-382.
- Wiemer, S., Benoit, J., 1996. Mapping the b-value anomaly at 100 km depth in the Alaska and New Zealand subduction zones. *Geophysical Research Letters*, 23,1557-1560.
- Wiemer, S., Wyss, M., 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States and Japan. *Bulletin of Seismological Society of America*, 90, 859- 869.
- Wiemer, S., Wyss, M., 2002. Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes. *Advances in Geophysics*, 45,259-302.
- Yolsal-Çevikbilen, S., Taymaz, T., Helvacı, C., 2014. Earthquake mechanisms in the Gulfs of Gokova, Sigacik, Kusadasi, and the Simav Region (western Turkey): Neotectonics, seismotectonics and geodynamic implications. *Tectonophysics*, 635,100-124.
- Zhou, Y.J., Zhou, S.Y., Zhuang, J.C., 2018. A test on methods for Mc estimation based on earthquake catalog. *Earth and Planetary Physics: Solid Earth: Seismology*, 2, 150- 162.



ESTIMATION OF THE MAXIMUM BENDING MOMENT OF CANTILEVER SHEET PILE WALLS BY USING MULTIPLE LINEAR REGRESSION ANALYSIS

Recep AKAN*

Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Isparta, TURKEY

Keywords

*Cantilever Sheet Pile,
Bending Moment,
Multiple Linear Regression,
Prediction,
Sand.*

Abstract

Sheet pile walls are flexible retaining structures that are used to hold the horizontal soil pressures behind them, especially in situations that cause stress changes such as excavation. They are divided into two as cantilever and externally supported. Cantilever walls are used in excavations with a maximum depth of 6 meters and are supported by anchors in excavations deeper than this. Some of the values to be calculated in the design of cantilever sheet pile walls are the embedment depth and the maximum bending moment that (M_{max}) will occur in the cross-section of the wall. There are various approaches in analytical methods that have complex calculation steps such as determining earth pressures, solving second and third-order equations. In this study, the M_{max} that will occur in the cross-section of a cantilever sheet pile wall penetrates in the sand is estimated by the expressions obtained with the help of multiple linear regression (MLR) analysis. The results showed that the M_{max} may not be achieved by only MLR models but with the help of polynomial equations.

KONSOL PALPLANŞ DUVARLARIN MAKSİMUM EĞİLME MOMENTİNİN ÇOKLU LİNEER REGRESYON ANALİZİ İLE TAHMİNİ

Anahtar Kelimeler

*Konsol Palplanş,
Eğilme Momenti,
Çoklu Lineer Regresyon,
Tahmin,
Kum.*

Öz

Palplanş duvarlar, özellikle kazı gibi gerilme değişikliklerine neden olan durumlarda, yatay zemin basınçlarını arkalarında tutmak için kullanılan esnek istinat yapılarıdır. Temel olarak konsol ve dış destekli olarak ikiye ayrılırlar. Maksimum 6 metre derinliğe sahip kazılarda konsol duvarlar kullanılır ve bundan daha derin kazılarda ankrajlarla desteklenir. Konsol palplanş duvarların tasarımında hesaplanacak değerlerden bazıları gömme derinliği ve duvar kesitinde oluşacak maksimum eğilme momentidir. Toprak basınçlarının belirlenmesi ve ikinci ve üçüncü mertebeden denklemlerin çözülmesi gibi karmaşık hesaplama adımlarına sahip analitik yöntemler için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu çalışmada, yapılacak bir kazı nedeniyle kuma gömülü bir konsol palplanş duvarın kesitinde oluşacak maksimum eğilme momenti, çoklu lineer regresyon analizi yardımıyla elde edilen ifadelerle tahmin edilmeye çalışılmıştır. Sonuçlar, sadece lineer regresyon modellerinin yardımı ile değil ancak tahmin sonuçlarının polinom ifadeler yardımıyla iyileştirilmesi sonucunda tatmin edici derecede başarılı tahmin edilebileceğini göstermiştir.

Alıntı / Cite

Akan, R., (2022). Estimation of the Maximum Bending Moment of Cantilever Sheet Pile Walls by Using Multiple Linear Regression Analysis, Journal of Engineering Sciences and Design, 10(1), 247-256.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

R. Akan, 0000-0002-9277-1659

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	23.09.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	27.10.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	26.11.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

*İlgili yazar / Corresponding author: recepakan@hotmail.com, +90-246-211-1197

1. Introduction

The demand for deep excavation has increased as the country's population and urbanization have grown so the necessity of bearing the horizontal earth pressure issues has arisen. Sheet pile walls are commonly employed applications in geotechnical engineering as retaining structures, notably to bear lateral earth pressures produced by excavation. Sheet pile walls can also be constructed of wood, reinforced concrete but usually steel. Steel sheet pile walls have interlocking edges so they can work as a whole wall and provide water impermeability.

Sheet pile walls are used as cantilever walls or externally supported walls, depending on soil properties, excavation depth. Cantilever sheet piles are utilized for heights of up to 5 to 6 m and anchors are linked to the sheet pile walls to offer greater passive resistance by the infill for beyond. Sheet pile walls, unlike retaining walls, are generally temporary constructions that are constructed to sustain the soil mass laterally and are flexible.

For more than six decades, sheet pile walls have been a subject of study. Rowe (1951), Bransby and Milligan (1975), and Seok et al. (2001) are some of the studies that have done model studies on embedded walls. In addition, Rowe (1952) investigated the impact of several factors on flexible retaining walls, including surcharge load, anchor position, excavation level, soil type, wall flexibility, and soil pressure distribution on the flexible retaining wall.

There are many theoretical methods used to calculate the maximum bending moment (M_{max}), which are commonly obtained by the approximate method based on the Rankine earth pressure theory in current civil engineering applications. There are various approaches that empirical and semi-empirical offer more accurate estimates (Coduto, 2001; Das, 2007; Rankine, 1857). Design tables for normalized embedment depths for sheet pile walls were published by Bolton et al. (1989, 1990a, 1990b) based on undrained shear strength for cohesive soils and friction angle for non-cohesive soils. For anchored sheet pile walls embedded in sandy soils, Hagerty and Nofal (1992) produced simplified design charts for normalized embedment depth and anchor strength. The embedment depths of sheet pile walls subjected to lateral linear stresses in cohesionless soils were estimated using normalized relationships by Choudry et al. (2006) and Gajan (2011). Akan (2020), investigated the impact of the increment ratio of the theoretical depth of the wall on the maximum bending moment and anchor force of a single anchored sheet pile wall in the sand with varied internal friction angles when the groundwater level occurs.

Mishra et al. (2020), used a functional network (FN), genetic programming (GP), and group data processing approach to simulate a retaining wall (GMDH). To get an expression for the design of the reinforced concrete retaining wall, Akbay et al. (2020) and to obtain a decision diagram for retaining wall selection, Choi and Lee (2010) used regression analysis. Srivastava and Malhotra (2016) used regression analysis to estimate passive horizontal earth pressures, and Dagdeviren and Kaymak (2020) used regression analysis to obtain a pre-sizing recommendation for a T-shaped retaining wall.

Azzouz et al. (1976) develop regression equations to predict the compression index and compression ratio from classification or index data, and statistical techniques are utilized to assess and evaluate experimental data from consolidation experiments on a wide variety of undisturbed soils. These regression equations are then compared to several other comparable but more limited empirical correlations that have been reported by other researchers. Yoon and Kim (2006) use consolidation data to develop site-specific empirical correlation models to estimate the compression index of inorganic marine clay at Kwangyang new port in Korea. Regression analysis is used to make correlations in calculating compression index utilizing. Natural water content, void ratio, liquid limit, plasticity index, passing percentage, and specific gravity are among the soil characteristics utilized. Hirata et al. (1990) used multiple regression analysis to properly identify the connections between a mechanical characteristic and several physical parameters in both natural and artificially blended cohesive soils. The shear strength of soils is represented by two types of regression models. The Atterberg limit is used in the first model, whereas the Cam-Clay model is used in the second. Teymen and Mengüç (2020) evaluated the characteristics of uniaxial compressive strength (UCS), unit weight, Brazilian tensile strength, Schmidt hardness, Shore hardness, point load index, and P-wave velocity. Simple regression analysis, multiple regression analysis, artificial neural networks, adaptive neuro-fuzzy inference system, and genomic expression programming have all been used to forecast the UCS. Using several graphs, the computed UCS values were compared to the real UCS values were then compared. Adefemi and Wole (2013) used two-way analysis of variance and multiple regression analysis to analyze the findings of statistical research on the impact of compaction delays on characteristics of lime stabilized yellowish-brown lateritic soil. Yoon et al. (2015) use in-situ experimental data from a range of slope locations in South Korea to develop an estimation method for calculating saturated hydraulic conductivity of Korean weathered granite soils. Using diverse physical soil characteristics, a robust regression analysis was conducted, and an empirical solution was proposed. Abdi et al. (2018) used artificial neural networks and multiple regression analysis to predict UCS and modulus of elasticity (E) in sedimentary rocks. Rock samples from four different rock types were cored and

submitted to extensive laboratory testing for this purpose. Physical characteristics of investigated rocks such as P wave velocity, dry density, porosity, and water absorption were used as model inputs, whereas UCS and E were used as output factors to build the prediction models. Mahdiabadi and Khanlari (2019) used MLR, multiple nonlinear regression, artificial neural networks, and adaptive neuro-fuzzy inference system to predict UCS and E in calcareous mudstones of the Aghajari Formation. The point loading, block punch, and cylinder punch tests were performed on samples of calcareous mudstones. The determination coefficients (R^2), mean absolute percentage error, and variance accounted for were used to evaluate the performance of the created models. Bera et al. (2005) offer a regression study on bearing capacity of square footing on reinforced pond ash. Using all feasible regression approaches based on model test data to choose the important subset of the predictors, a power model was constructed to estimate bearing capacity of a square footing on reinforced pond ash at any settlement. Kumar et al. (2013) want to use soft computing techniques like multiple regression and artificial neural network models to forecast rock characteristics using drill bit speed, penetration rate, drill bit diameter, and equivalent sound level produced while drilling as input factors. UCS, Schmidt rebound number, dry density, P wave velocity, tensile strength, E, and porosity n were determined using a database of instances, and the prediction abilities of models were examined.

The M_{max} that will occur in the cross-section of a cantilever sheet pile wall is calculated in this work using expressions acquired from multiple linear regression (MLR) analysis, which simplifies the calculation procedure. For this aim, a cantilever sheet pile wall was driven into a sandy soil with the groundwater level at the dredge line in front and at various levels from the soil surface to the dredge line rear of the wall was modeled with the aid of Matlab R2015a. The acquired M_{max} findings are then submitted to MLR analysis using SPSS Statistics v17.0, and MLR expressions are created to estimate the M_{max} . The accuracy of the estimation is measured using the determination coefficient (R^2) and the mean absolute relative error (MARE), and the findings are encouraging.

2. Material and Method

The findings of the M_{max} were acquired by executing step-by-step MLR analysis with the assistance of SPSS Statistics v17.0, and the solutions of a total of 833 cantilever sheet pile wall models were conducted with the help of Matlab R2015a. As a next step, the acquired results from MLR equations were enhanced with polynomial functions. Established regression models and improved models, expressions, and estimation assessment criteria presented in tables and scatter plots illustrated in figures.

2.1. Cantilever Sheet Pile Walls

In the experimental investigations, the cantilever sheet pile walls rotated from a position such as O, and therefore the active and passive earth pressures switched places at the bottom of this point (Das, 2014). Figure 1 depicts the earth pressures that will occur in this situation.

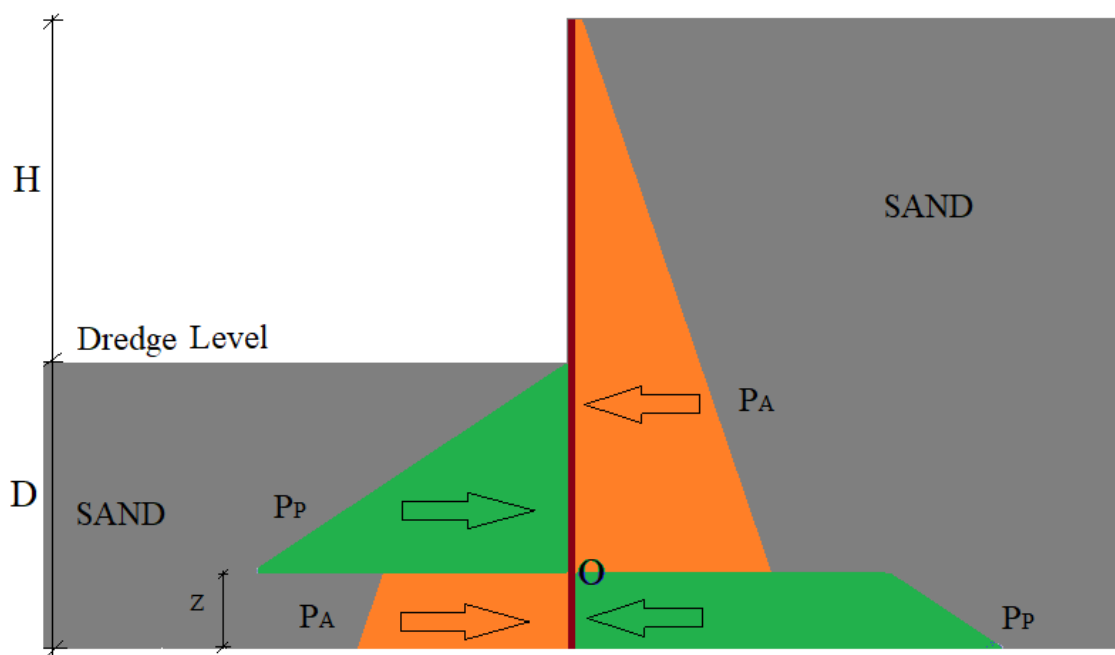


Figure 1. Lateral Earth Forces (P_A , P_P) Acting on the Cantilever Sheet Pile Wall

The approximation analytical approach was utilized to simplify the solutions. The active and passive pressure distributions behind the wall and in front of the wall are assumed to extend to the bottom of the wall in the approximation analysis, while the passive pressure behind the wall below the O point operates at the base of the wall (Sitharam, 2013). Figure 2 depicts lateral soil pressure distributions using the approximation analysis approach.

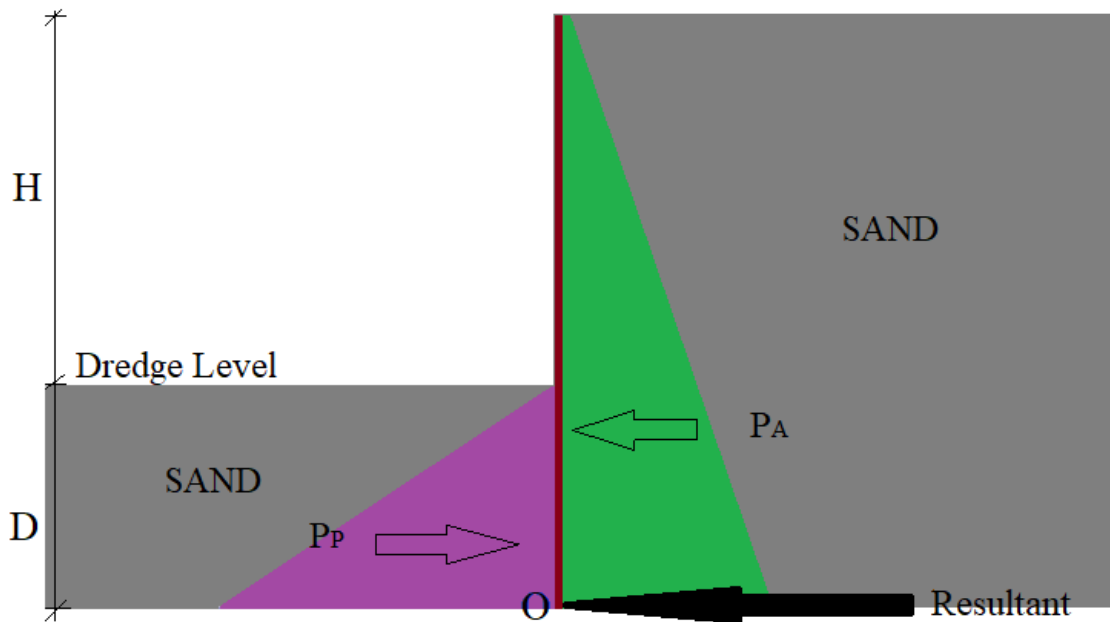


Figure 2. Lateral Earth Forces (P_A , P_P) Adopted in the Approximate Method

Rankine's theory may be used to determine the active and passive lateral earth pressure coefficients, as shown below (Rankine, 1857)(Eqs. 1-2).

$$K_a = \frac{1 - \sin(\phi)}{1 + \sin(\phi)} \tag{1}$$

$$K_p = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \tag{2}$$

where ϕ is the internal friction angle of soil. The active and passive earth pressures for cantilever sheet pile walls may be calculated using Rankine's theory. as well as the moment equilibrium achieved at the wall's base, using the following formulas (Eqs. 3-5).

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma' (H + D)^2 K_a \tag{3}$$

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma' D^2 K_p \tag{4}$$

$$(H + D)^3 K_a = D^3 K_p \tag{5}$$

The excavation depth is denoted by H, whereas the embedment depth is denoted by D. Equation 6 may also be used to get γ' , which is the effective unit weight of soil. The unit weight of water, γ_w , is assumed as 9.81 kN/m³ for the study purposes.

$$\gamma' = \gamma_s - \gamma_w \tag{6}$$

3.2. Model

The internal friction angle (ϕ) of the sand is raised by 1° in the range of 20° to 45°, excavation depth (H) and groundwater level (GWL, L_1) are increased by 0.5m in the ranges of 2m to 6m and 0m to 6m in the models for the solution of the Mmax, respectively. The natural unit weight of the soil above the GWL is $\gamma_n = 19$ kN/m³, whereas the saturated unit weight of the soil below the GWL is $\gamma_s = 21$ kN/m³. Figure 3 depicts a schematic illustration of the relevant model.

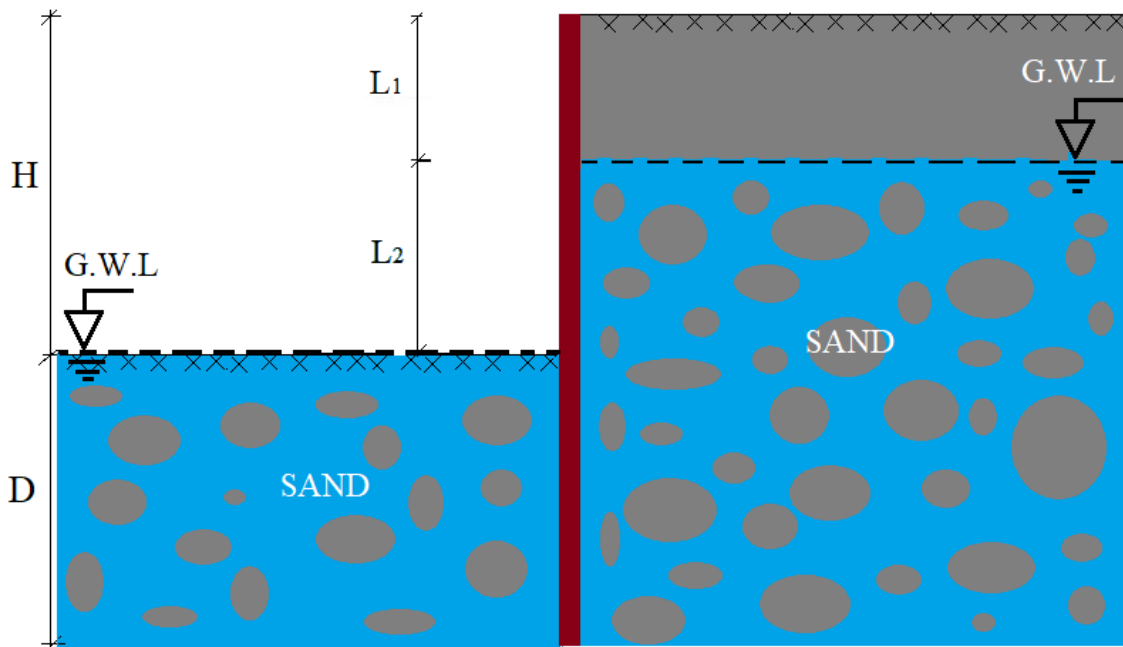


Figure 3. The Soil Profile and Cantilever Sheet Pile Wall Model

Figure 4 illustrates the active and passive lateral earth pressures, as well as the hydrostatic water pressure, that will act in the built model. The components of active earth pressure (P'_{A1} , P'_{A2} , P'_{A3} , P'_{A4} , P'_{A5}), passive earth force (P_P), and hydrostatic water force (P_w) may be calculated using the formulas below (Eqs. 7-10).

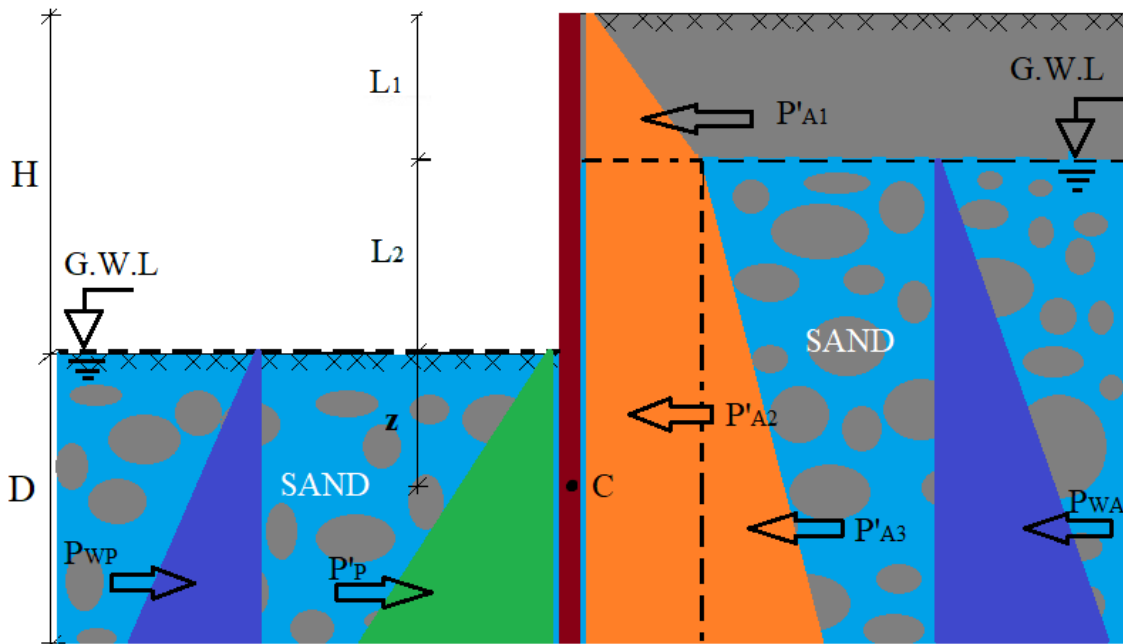


Figure 4. The Components of the Lateral Forces Acting on the Sheet Pile Wall

$$P'_{A1} = \frac{1}{2} K_a \gamma_n L_1^2 \tag{7}$$

$$P'_{A2} = \gamma_n K_a L_1 (L_2 + D) \tag{8}$$

$$P'_{A3} = \frac{1}{2} K_a \gamma' (L_2 + D)^2 \tag{9}$$

$$P'_P = \frac{1}{2} K_P \gamma' D^2 \tag{10}$$

$$P_{WA} = \frac{1}{2} \gamma_w (D + L_2)^2 \tag{11}$$

$$P_{WP} = \frac{1}{2} \gamma_w D^2 \tag{12}$$

At a depth such as z , where the forces calculated above cancel each other out horizontally, the shear force is zero and the bending moment is maximum. The following equation (Eq. 13) determines this depth, z , and the value of the moment at a point of C at this depth yields the M_{max} (Eq. 14).

$$P'_{A1} + \gamma_n K_a L_1 (L_2 + z) + \frac{1}{2} K_a \gamma' (L_2 + z)^2 + \frac{1}{2} \gamma_w (z + L_2)^2 - \frac{1}{2} K_p \gamma' D z^2 - \frac{1}{2} \gamma_w z^2 = 0 \tag{13}$$

$$M_{max} = P'_{A1} \left(z + L_2 + \frac{L_1}{3} \right) + \frac{1}{2} \gamma_n K_a L_1 (L_2 + z)^2 + \frac{1}{6} K_a \gamma' (L_2 + z)^3 + \frac{1}{6} \gamma_w (z + L_2)^3 - \frac{1}{6} K_p \gamma' z^3 - \frac{1}{6} \gamma_w z^3 \tag{14}$$

3.3. Multiple Linear Regression (MLR) Analysis

Regression analysis, which is extensively used in statistics, uses mathematics to anticipate linear connections between data (Olmschenk et al., 2019). An independent variable and a dependent variable have a cause-and-effect relationship in basic regression analysis (Sato-Ilic, 2017). There is one dependent variable and at least two independent variables in an MLR analysis. Simple regression analysis and MLR analysis are two types of regression analysis depending on the number of independent variables. The regression analysis method is used to investigate the impact of independent variables on the dependent variable as well as the cause-and-effect connection between them (Chantana et al., 2019; Zhang and Thomas, 2012).

A general MLR equation is as follows (Eq. 15).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \tag{15}$$

where Y is the dependent variable, X is the independent variable, and ε is the error term in the equation.

In this paper, 833 cantilever sheet pile wall models were solved using Matlab R2015a, and the results of M_{max} were analyzed by performing a step-by-step MLR analysis using SPSS Statistics v17.0. Two MLR models that have the highest R^2 were examined and enhanced by using polynomial functions derived from trend curves of estimated and calculated M_{max} (Fig. 5-6). The dependent variable in both models is M_{max} , whereas the independent variables are f_i, H, L_1 in the first model and f_i, H_i, L_1 , and L_1H in the second. Here, f_i denotes the internal friction angle (ϕ), H denotes the excavation depth, L_1 denotes the groundwater level (GWL), and L_1H denotes the GWL to H ratio. R^2 and MARE evaluate the improved and unimproved prediction performance of both models. The R^2 is a criterion for determining how closely variables in a regression equation are related (Polat, 2015). R^2 assesses a regression equation's accuracy as well as the influence of an independent variable on the dependent variable. As a result, the coefficient of determination is used to analyze the connection between dependent and independent variables in various analytic situations. In addition, MARE was utilized as a second assessment criterion to measure the estimating success of the produced expressions, which determines the percent difference between estimated and calculated M_{max} outcomes using the equation below (Eq. 16).

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{T_t - H_t}{H_t} \right| * 100 \tag{16}$$

- n : Number of data evaluated
- T_t : Estimated value
- H_t : Calculated value

4. Results

Table 1 displays the variables and the adjusted R^2 of various models while Table 2 displays the MLR equations, R^2 , and MARE of Model 3 and Model 4 which have the highest R^2 . As shown in Table 1, model 4 using f_i, H, L_1 , and L_1H as variables produces the best results among the models developed to predict the M_{max} . Models 3 and 4, which are the best two models were investigated in this study, and the findings are shown in Figs. 5-6 and Table 2.

Table 1. Results of MLR Analysis

Model	Independent Variables	R	R Square	Adjusted R Square
1	H	.703	.495	.494
2	H- f_i	.834	.695	.694
3	H- f_i - L_1	.920	.847	.846
4	H- f_i - L_1 - L_1H	.933	.871	.871

Model 3, which is developed by adding the L1 variable to the fi and H variables, has a 22 percent improvement in R² when compared to Model 2. Similarly, the R² value of Model 4 developed by adding the L₁H variable to Model 3 increased by 3% when compared to Model 3 when the MARE decreased about 13% (Table 2). This demonstrates that all variables have a substantial influence on estimating Mmax.

Table 2. Equations and Variables of MLR Model 3 and Model 4

Model	Independent Variables	The equation obtained from MLR analysis (x)	MARE (%)	R ²
3	H-fi-L ₁	Mmax=637.290+342.487*H-39.814*fi -146.584*L ₁	75.359	.846
4	H-fi-L ₁ -L ₁ H	Mmax=-379.723+542.429*H-39.814*fi - 424.294*L ₁ +1400.452* L ₁ H	65.577	.871

Model 3 has adjusted R² of 0.846 and MARE of 75.359%, whereas Model 4 has adjusted R² 0.871 and MARE of 65.577% (Table 2). Figures 5 and 6 depict the dispersion of theoretically computed values versus estimated values derived from the regression equations of Model 3 and Model 4.

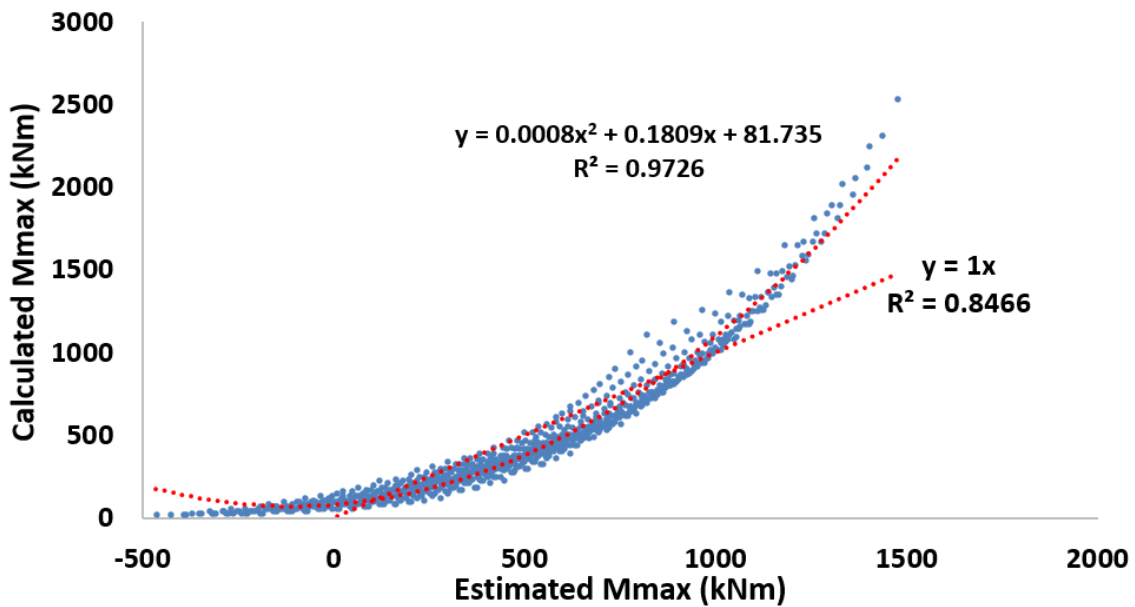


Figure 5. Scatter of Estimated and Calculated Mmax Results of Model 3

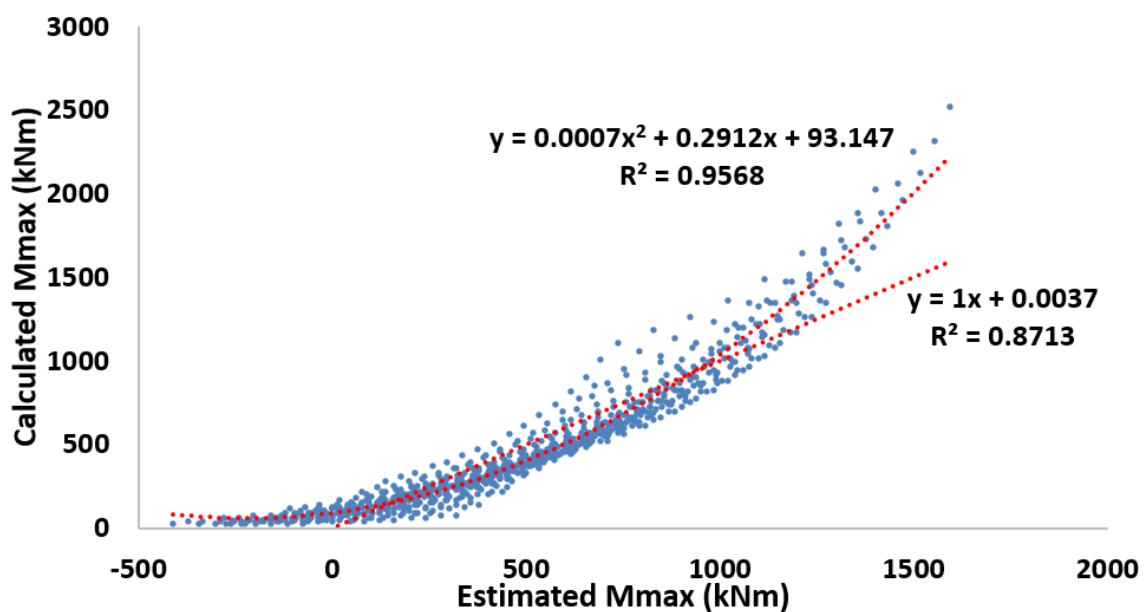


Figure 6. Scatter of Estimated and Calculated Mmax Results of Model 4

Figures 5-6 include a polynomial curve that depicts the connection between computed and estimated Mmax values. The Mmax values predicted by the MLR equations are employed as a variable in the equation of this polynomial curve and the accuracy of the calculation is enhanced. The R² and MARE values of these polynomial equations and the improved predictive values obtained with them are shown in Table 3, and scatter diagrams of the calculated values and the improved predictive values are shown in Figures 7-8.

Table 3. Polynomial Equations for Improving the Results of the Mmax of Model 3 and Model 4

Model	Polynomial Equations	MARE (%)	R ²
3	$0.0008x^2 + 0.1809x + 81.735$	20.622	0.979
4	$0.0007x^2 + 0.2912x + 93.147$	22.005	0.949

The R² increases from 0.846 to 0.979 for Model 3 and from 0.871 to 0.949 for Model 4 with the help of the polynomial equation, while the MARE decreases from 75.359 to 20.622 and from 65.577 to 22.005, respectively. It is shown that Model 3 increases the prediction success by 16% based on R² and 73% based on MARE, while the prediction success of Model 4 increases by 9% based on R² and 66% based on MARE.

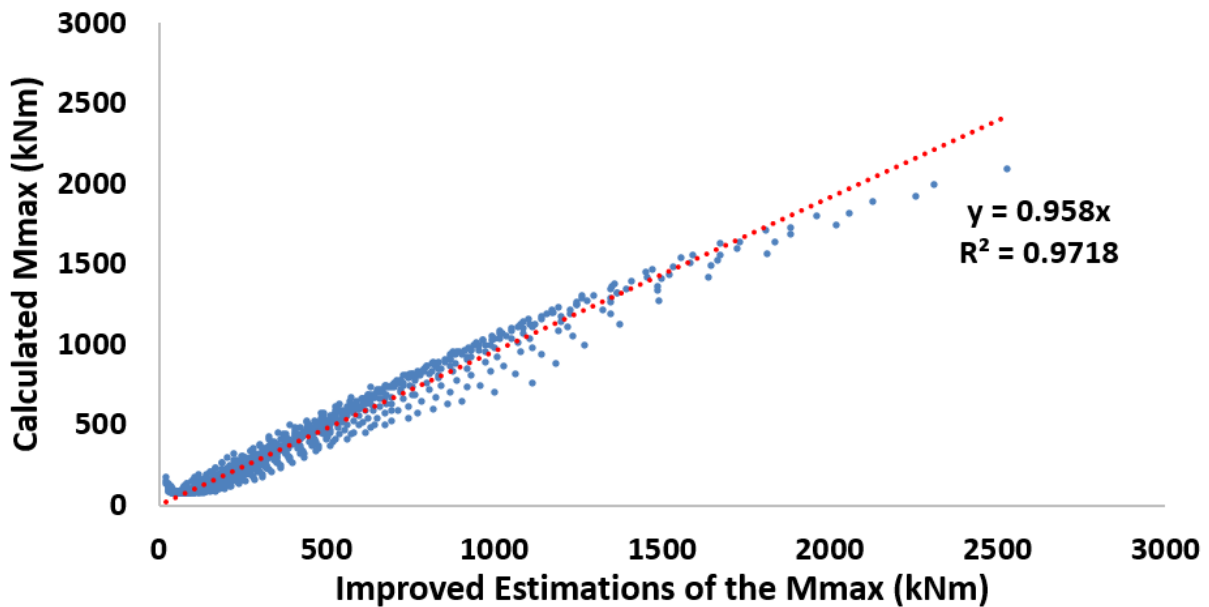


Figure 7. Scatter of Improved Estimations and Calculated Results of the Mmax of Model 3

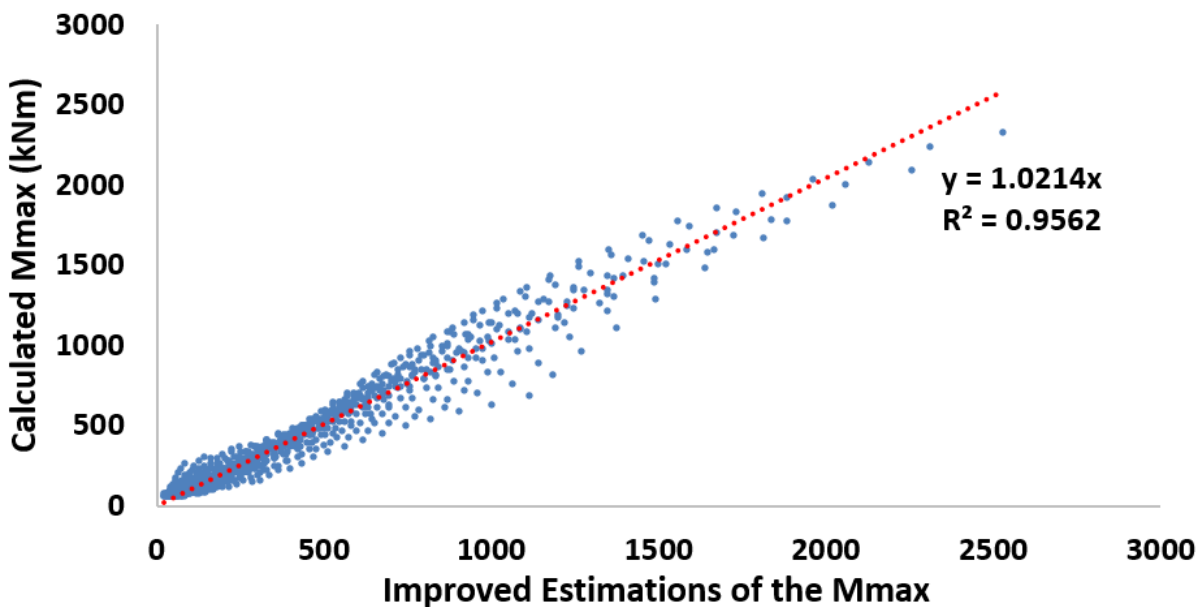


Figure 8. Scatter of Improved Estimations and Calculated Results of the Mmax of Model 4

The adjusted R^2 of the polynomial equation recommended for Model 3 is 0.979 while the MARE is 20.622% and the adjusted R^2 of the polynomial equation recommended for Model 4 is 0.949 while the MARE is 22.005%. Although both models have the satisfying predictive capability with the help of polynomial equations it is seen that Model 3 provides more successful prediction than Model 4.

5. Conclusion

The M_{max} that will occur in the cross-section of a cantilever sheet pile wall is calculated in this work using expressions acquired from MLR analysis, which simplifies the calculation procedure. For his aim, a cantilever sheet pile wall was driven into a sandy soil with the groundwater level at the dredge line in front and at various levels from the soil surface to the dredge line rear of the wall was modeled with the aid of Matlab R2015a. Then the obtained M_{max} results are subjected to MLR analysis with the help of SPSS Statistics v17.0 and MLR expressions to estimate the M_{max} are generated. Accordingly, the following conclusions can be drawn:

- The best model established to determine the M_{max} has R^2 of 0.846 and MARE of 75.359%. This is an unsuccessful result for the estimation of the M_{max} by the MLR analysis.
- The M_{max} in the cantilever sheet pile wall, can be estimated by using linear MLR models with an enhancement by polynomial equations with R^2 of 0.98 and MARE of 20.6.
- It is shown that Model 3 increases the prediction success by 16% based on R^2 and 73% based on MARE.
- The best model to predict the M_{max} has internal friction angle of sand, groundwater level, and excavation depth as independent variables.
- All the results and conclusions presented in the study, include the study-specific soil profile and sheet pile wall design conditions. In order to be generalized, it needs to be expanded by further studies.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

References

- Abdi, Y., Garavand, A.T., Sahamieh, R.Z., 2018. Prediction of strength parameters of sedimentary rocks using artificial neural networks and regression analysis. *Arab. J. Geosci.* 2018 1119 11, 1–11. <https://doi.org/10.1007/S12517-018-3929-0>
- Adefemi, B.A., Wole, A.C., 2013. Regression Analysis of Compaction Delay on CBR and UCS of Lime Stabilized Yellowish Brown Lateritic Soil. *EJGE* 18, 3301–3314.
- Akbar, Z., Dalyan, İ., Akin, M.S., Gençdal, H.B., 2020. An Application of TBEC-2018 in the Prediction of Retaining Wall Dimensions with Simple Regression Analysis. *Glob. J. Civ. Eng.* 2.
- Azzouz, A.S., Krizek, R.J., Corotis, R.B., 1976. Regression Analysis of Soil Compressibility. *Soils Found.* 16, 19–29. https://doi.org/10.3208/SANDF1972.16.2_19
- Bera, A.K., Ghosh, Ambarish, Ghosh, Amalendu, 2005. Regression model for bearing capacity of a square footing on reinforced pond ash. *Geotext. Geomembranes* 23, 261–285. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTEXMEM.2004.09.002>
- Bolton, M.D., Powrie, W., Symons, I.F., 1990a. The design of stiff in-situ walls retaining over consolidated clay-Part II: short-term behaviour (continued). *Gr. Eng.* 22, 34–40.
- Bolton, M.D., Powrie, W., Symons, I.F., 1990b. The design of stiff in-situ walls retaining over consolidated clay-Part II: long-term behaviour (continued). *Gr. Eng.* 23, 22–28.
- Bolton, M.D., Powrie, W., Symons, I.F., 1989. The design of stiff in-situ walls retaining over consolidated clay-Part I: short-term behaviour. *Gr. Eng.* 22, 44–47.
- Bransby, J.E., Milligan, G.W.E., 1975. Soil Deformations near Cantilever Retaining Walls. *Geotechnique* 24, 175–195.
- Chantana, J., Kawano, Y., Kamei, A., Minemoto, T., 2019. Description of degradation of output performance for photovoltaic modules by multiple regression analysis based on environmental factors. *Optik (Stuttg.)*. 179, 1063–1070. <https://doi.org/10.1016/J.IJLEO.2018.11.040>
- Choi, M., Lee, G., 2010. Decision tree for selecting retaining wall systems based on logistic regression analysis. *Autom. Constr.* 19, 917–928. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2010.06.005>
- Choudry, D., Singh, S., Goel, S., 2006. New approach for analysis of cantilever sheet pile with line load. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 43, 540–549.
- Coduto, D.P., 2001. *Foundation Design: Principles and Practices*. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Dagdeviren, U., Kaymak, B., 2020. A regression-based approach for estimating preliminary dimensioning of reinforced concrete cantilever retaining walls. *Struct. Multidiscip. Optim.* 61, 1657–1675. <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02470-w>
- Das, B.M., 2014. *Principles of Foundation Engineering*. Cengage Learning, Boston, MA, USA.
- Das, B.M., 2007. *Principles of Foundation Engineering*, 6th Edition. Brooks/Cole Publishing Company, Pacific Grove, CA.
- Gajan, S., 2011. Normalized Relationships for Depth of Embedment of Sheet Pile Walls and Soldier Pile Walls in Cohesionless Soils. *Soils Found.* 51, 559–564. <https://doi.org/10.3208/SANDF.51.559>
- Hagerty, D.J., Nofal, M.M., 1992. Design aids-anchored bulkheads in sand. *Can. Geotech. J.* 29, 789–795.
- Hirata, S., Yao, S., Nishida, K., 1990. MULTIPLE REGRESSION ANALYSIS BETWEEN THE MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF COHESIVE SOILS. *SOILS Found.* 30, 91–108. https://doi.org/10.3208/SANDF1972.30.3_91

- Mahdiabadi, N., Khanlari, G., 2019. Prediction of Uniaxial Compressive Strength and Modulus of Elasticity in Calcareous Mudstones Using Neural Networks, Fuzzy Systems, and Regression Analysis. *Period. Polytech. Civ. Eng.* 63, 104–114. <https://doi.org/10.3311/PPCI.13035>
- Olmschenk, G., Zhu, Z., Tang, H., 2019. Generalizing semi-supervised generative adversarial networks to regression using feature contrasting. *Comput. Vis. Image Underst.* 186, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2019.06.004>
- Polat, Ö., 2015. A robust regression based classifier with determination of optimal feature set. *J. Appl. Res. Technol.* JART 13, 443–446. <https://doi.org/10.1016/J.JART.2015.08.001>
- Rankine, W.J., 1857. II. On the stability of loose earth. *Philos. Trans. R. Soc. London* 147, 9–27.
- Rowe, P.W., 1952. Anchored Sheet-pile walls. *Proc. Inst. Civ. Eng.* 1, 27–70. <https://doi.org/10.1680/iicep.1952.10942>
- Rowe, P.W., 1951. Cantilever sheet piling in cohesionless soil, in: *Engineering. Institution of Civil Engineer, London, England*, pp. 316–319.
- Sato-Ilic, M., 2017. Knowledge-based Comparable Predicted Values in Regression Analysis. *Procedia Comput. Sci.* 114, 216–223. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2017.09.063>
- Seok, J.W., Kim, O.Y., Chung, C.K., Kim, M.M., 2001. Evaluation of ground and building settlement near braced excavation sites by model testing. *Can. Geotech. J.* 38, 1127–1133. <https://doi.org/10.1139/CGJ-38-5-1127>
- Sitharam, T.G., 2013. *Advanced Foundation Engineering*. Indian Institute of Science, Bangalore, India.
- Srivastava, A., Malhotra, M., 2016. Earth Pressure behind a Retaining Wall under Linearly Varying Geotechnical Parameters. *Indian J. Sci. Technol.* 9, 1–8. <https://doi.org/10.17485/IJST/2016/V9IS1/105809>
- Teymen, A., Mengüç, E.C., 2020. Comparative evaluation of different statistical tools for the prediction of uniaxial compressive strength of rocks. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 30, 785–797. <https://doi.org/10.1016/J.IJMST.2020.06.008>
- Yoon, G.L., Kim, B.T., 2006. Regression Analysis of Compression Index for Kwangyang Marine Clay. *KSCE J. Civ. Eng.* 10, 415.
- Yoon, S., Lee, S.R., Kim, Y.T., Go, G.H., 2015. Estimation of saturated hydraulic conductivity of Korean weathered granite soils using a regression analysis. *Geomech. Eng.* 9, 101–113. <https://doi.org/10.12989/GAE.2015.9.1.101>
- Zhang, J., Thomas, L.C., 2012. Comparisons of linear regression and survival analysis using single and mixture distributions approaches in modelling LGD. *Int. J. Forecast.* 28, 204–215. <https://doi.org/10.1016/J.IJFORECAST.2010.06.002>



ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜÇ AKIŞI ANALİZİ VE BİR EĞİTİM ARACININ GELİŞTİRİLMESİ

İbrahim ŞENGÖR^{1,2*}, Mehmet Cenk KAYA¹

¹ İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

² University College Cork, Environmental Research Institute, MaREI Centre, Cork, Ireland

Anahtar Kelimeler Öz

Güç Akışı Analizi,
Newton-Raphson
Yöntemi,
Python,
Qt Designer.

Gelişen teknoloji ve artan çevresel kaygılar, elektrik enerjisine olan talebi her geçen gün artırmaktadır. Ayrıca, elektrik güç sistemlerinin (EGS) işletimi sırasında en çok zorlanılan konulardan biri de sürdürülebilir ve kaliteli elektrik enerjisi sağlamaktır. Diğer yandan, üretim tarafında rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları dahil edilirken tüketim tarafında da elektrikli araçlar gibi yeni yüklerin sayısı artmaktadır. Bahsedilen gelişmeler, EGS'lerde çözülmesi gereken önemli operasyonel sorunlara neden olmaktadır. Uygulama sürecinde oluşabilecek sorunları önceden tespit edilebilmesi için güç akışı analizi önem kazanmıştır. Güç akışı, hatlardaki aktif ve reaktif güç akışını, baraların voltajını ve faz açısını, hatlardan geçen akımı ve buna bağlı olarak sistemde meydana gelen güç kayıplarını belirlemek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada EGS'lerde güç akışı analizi incelenmiş ve ilgili alanda eğitim gören mühendislik öğrencilerinin güç akışını daha iyi anlamaları için bir eğitim aracı geliştirilmiştir. IEEE 14 baralı test sistemi kullanılarak QtDesigner üzerinden arayüz tasarımı sağlanmış ve Python programlama dilinin NumPy kitaplığında Newton-Raphson yöntemi kullanılarak güç akışı analizi yapılmıştır. Geliştirilen model ve arayüzün test edilebilmesi için farklı durum çalışmaları oluşturulmuştur.

POWER FLOW ANALYSIS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS AND DEVELOPMENT OF AN EDUCATION TOOL

Keywords

Power Flow Analysis,
Newton-Raphson
Method,
Python,
Qt Designer.

Abstract

The recent development of technology and the increased environmental concern give rise to the demand for electrical energy. Furthermore, one of the most challenging tasks during the operating of EPSs is to provide sustainable and quality electric power. On the other hand, renewable energy sources such as wind and solar are integrated into the electric power systems (EPSs) on the supply side, while the penetration of new loads such as electric vehicles has been raising on the demand side as well. The mentioned changes on EPSs cause significant operational issues to figure out. To foresee the problems that may occur during the application process, the power flow analysis (PFA) has gained importance. PFA is used to determine the active and reactive power flow on the lines, the voltage and the phase angle of the buses, the current flowing through the lines, and accordingly the energy losses of the system. In this study, power flow analysis in EPSs has been examined and an educational tool has been developed for engineering students studying in the related field to provide a better understanding of power flow. Using the IEEE 14 bus test system, the interface design has been provided via QtDesigner, and the power flow analysis has been performed by using the Newton-Raphson method in the NumPy library of the Python programming language. To test the developed model and interface, various case studies have been evaluated.

Alıntı / Cite

Sengor, I., Kaya, M. C., (2022). Elektrik Güç Sistemlerinde Güç Akışı Analizi ve Bir Eğitim Aracının Geliştirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 257-271.

* İlgili yazar / Corresponding author: ibrahim.sengor@ikcu.edu.tr, +90-232-329-3758

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
İ. Şengör, 0000-0002-9451-4218	Başvuru Tarihi / Submission Date	30.09.2021
M. C. Kaya, 0000-0002-2714-830X	Revizyon Tarihi / Revision Date	11.11.2021
	Kabul Tarihi / Accepted Date	23.11.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

1.1. Motivasyon (Motivation)

Günümüzdeki teknolojik gelişmelere ek olarak, maliyetlerin düşmesi, karar koyucuların sıfır karbon emisyonu hedeflerine yönelik yeni politikalar uygulaması nedeniyle elektrik enerjisine olan talep hızlı bir şekilde artmaktadır. Buna bağlı olarak üretim tarafına rüzgâr gibi doğası gereği kesintili üretim gerçekleştiren yenilenebilir tabanlı enerji santralleri devreye alınırken, tüketim tarafında da artan geleneksel tüketim talebine ek olarak elektrikli araçlar gibi yeni yükler de sisteme dahil olmaktadır. Ayrıca, mevcut sistemde var olan enerji kaynaklarının ekonomik ve güvenli şekilde kullanılması gerekliliği unutulmamalıdır (Levi vd., 2001). IRENA'nın sunduğu verilere göre, Türkiye'de toplam yenilenebilir enerji üretim kapasitesi 2010 yılında 17 bin 369 MW iken, 2019 yılında bu değer 44 bin 587 MW'a yükselmiştir (IRENA, 2020). Ayrıca düzenli olarak yayınlanan Global Elektrikli Araçlar raporuna göre 2030 yılına gelindiğinde yollarda olan elektrikli araç sayısının dünya çapında 130 milyon ile 250 milyon arasında olacağı öngörülmektedir (International Energy Agency, 2019). Saygın vd. (2019) hazırladığı rapora göre Türkiye'de ise aynı yıllarda 300 bin ile 800 bin arasında elektrikli araç satışının gerçekleşmesi tahmin edilmektedir. Son yıllarda gittikçe daha da karmaşık hale gelen birbirine bağlı ve bağımsız şebekeleri planlarken ve işletirken mühendislerin detaylı çalışmalar yapması gerekmektedir. Şebekeye dahil edilen yenilenebilir enerji sistemleri ve elektrikli araç sayılarındaki artış bu karmaşıklığa neden olan etmenler olarak gösterilebilir. Enerji sistemleri, enerji iletim ve dağıtım hatları, elektrik makineleri ve koruyucu elemanlardan oluşmaktadır. Bu sistemler elektrik enerjisinin üretilmesini, iletilmesini, dağıtılmasını ve kullanılmasını sağlar. Enerji sistemlerinin planlanması, işletilmesi ve kontrolünde bilgisayar destekli çözüm teknikleri kullanılmaktadır. Elektrik güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan analizlerden biri de güç akış analizidir. Bu nedenle ilgili alanda eğitim alan mühendislik öğrencilerinin, bu konuda özel olarak uzmanlaşmaları sürdürülebilir bir güç sistemi için oldukça önemlidir.

1.2. Literatür Taraması (Literature Review)

Literatürde elektrik güç sistemlerinde güç akışı analizini ele alan birçok çalışma bulunmaktadır. Son yıllarda bu çalışmalar optimal güç akışı yönüne evrilmiş olup sezgisel yöntemlerin çözüm süresinde sağladığı avantaj nedeniyle öne çıktığı görülmektedir. Ayrıca giderek dijitalleşen dünyaya eğitim sektörü de hızlı bir şekilde uyum sağlamış olup eğitim amaçlı güç akışı analizi irdelemek üzere literatüre kullanıcı dostu arayüzler sunulmaktadır. Levi vd. (2001) iletim kayıplarının neredeyse sıfır olduğu ve Newton-Raphson yöntemini kullanarak bir yük akış modeli üzerine çalışmışlardır. Dzafic vd. (2004) enerji sistemlerini analiz etmek için, Windows tabanlı görselleştirilmiş ve anlaşılır bir paket üzerinde çalışmışlardır. Liu vd. (2002) birden fazla üretim sistemine sahip dağıtım sistemlerinde güç akışı problemlerini çözmek için bir güç akışı analizi geliştirmişlerdir. Chow ve Cheung (1992) güç akışı analizi için enerji sistemlerinde lineer sistem analizini kullanmışlardır. Yu vd. (1994) santrallere katkı sağlamak için baralardaki aktif ve reaktif gücü grafik olarak gösteren bir çalışma yapmışlardır. Böylece sistemdeki güç dengesini gözlemlemeyi amaçlamışlardır. Islam ve Chowdhury (2001) sistem operatörleri ve mühendisler için baralardaki gerilim ve faz açılarına ek olarak iletim hatlarındaki güç akışlarını gösteren bir simülasyon üzerinde çalışmışlardır. Vournas vd. (2004) elektrik güç sistemlerinde eğitim amacıyla asenkron motorlar, regülatörler, statik VAR kompensatörlerin yanı sıra hidroelektrik santralleri, rüzgâr türbinleri ve jeneratörleri içeren simülasyon platformu geliştirmişlerdir. Ekinci vd. (2017) yük akış için Newton-Raphson yöntemini kullanan, çeşitli baraların gerilimlerini ve açıları ve ayrıca aktif ve reaktif güç akışını belirlemek için bir şebeke analizi üzerine eğitim kiti geliştirmişlerdir. Shin vd. (1999) kullanıcı dostu bir grafik kullanıcı arayüzü ile enerji sistemlerinin modellenmesi, analizi ve işletilmesi konusunda eğitim ve öğretim için geliştirilen Windows tabanlı bir etkileşimli grafik paketi üzerinde çalışmışlardır. Thurner vd. (2018) Python tabanlı, matematik analizi ve veri işlemek için NumPy ve SciPy kütüphanelerini kullanan bir güç sistemi analiz aracı üzerine çalışmışlardır. Milano (2013), MATLAB dilinin aksine modüler nesne yönelimli kod oluşturmayı ve yeniden kullanmayı kolaylaştıran, güç sistemlerini analiz etmek için Python tabanlı bir yazılım aracı üzerinde çalışmıştır. Ayrıca, Hakim vd. (2016) Python dilini kullanarak dikkörtgen gerilim koordinatları tabanlı çalışan bir güç akışı yazılım aracı geliştirmişlerdir. Dikkörtgen koordinatların kutupsal koordinatlara göre hesaplama esnasında daha verimli olduğunu öne sürmüşlerdir. Ayrıca güç akışı analizi esnasında çözüm yöntemi olarak Newton-Raphson yöntemi kullanılmış ve bir kullanıcı arayüzü geliştirilmiştir. Overbye vd. (1995) elektrik şebekesi işletimi ve kontrolünü öğretmek için kullanımı kolay, 13 baralı bir sistemi içeren bir güç sistemi simülasyon programı üzerinde çalışmışlardır. Srikanth vd. (2013) IEEE-14 baralı test sisteminde güç akışı analizi gerçekleştirmişlerdir. Buna bağlı

olarak iletim hatları üzerinde akan aktif/reaktif güçler hesaplanmış ve baraların gerilimlerini ve faz açıları da belirlemiştir. Sidea vd. (2017) güç mühendisliği öğrencilerinin, güç şebekesinin kararlı durum çalışmasını daha iyi anlamaları için bir arayüze sahip ve yük akış hesaplamaları gerçekleştirebilen bir araç kutusu üzerinde çalışmışlardır. Lai vd. (2014) öğrencilerin mikro şebekeleri anlayabilmeleri için çeşitli parametrelerin kullanıcı tarafından belirlenebildiği, güç akışı analizi ve geçici kararlılık analizini yapabilen bir simülasyon programı üzerinde çalışmışlardır. Fernandes vd. (2018) Python programlama dilinin enerji sistemleri analizi alanında eğitim ve araştırma için nasıl uygun olabileceğini tartışmışlardır. Elektrik güç mühendisliği öğrencilerinin bilgisayar mühendisliği anlayışına sahip olmasının ve programlamayı öğrenmeleri gerektiğinin büyük önem taşıdığını düşünmektedirler. Ayrıca literatürde elektrik güç sistemlerinde güç akışı analizi ve buna bağlı olarak geliştirilen çalışmaları kapsamlı şekilde ele alan birçok derleme makale çalışması da mevcuttur. Bunlara bir örnek olarak, Turner vd. (2014) elektrik mühendisliği uygulamalarında kullanılmaya hazır simülasyon yazılımının etkinliğini açıklayan mevcut literatürü incelemişler ve bu tür araçların eğitim için kullanılmasının etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, bahsi geçen çalışmada görsel grafiklerin kullanılmasının mühendislik eğitimi üzerinde olumlu etkileri olduğu öne sürülmüştür.

Yukarıda bahsi geçen çalışmalar ve tamamına bu çalışmada değinilemeyecek pek çok başka çalışma elektrik güç sistemlerinde güç akışı analizinin önemine vurgu yapmışlar ve bu konunun ilgili alandaki mühendislik öğrencileri tarafından anlaşılması gerektiğini ortaya koymuşlardır. Literatürdeki yazarların katkıları sonucunda bu çalışmada basit, anlaşılır, iyi bir görsellik sunan yük akışı analizi incelenmiş ve kullanıcı dostu bir eğitim aracı geliştirilmesi hedeflenmiştir.

1.3. Çalışmanın Katkıları ve Organizasyonu (Contributions and Organisation of Studies)

Bu çalışmada, mühendislik öğrencilerinin kullanımı için güç akış çözümü ve analizini gerçekleştirebilmek amacıyla, kullanıcı odaklı arayüze sahip güç akış eğitim platformu geliştirilmiştir. Tasarlanan güç sistemi analiz programında amaç kurulan sistem üzerinde farklı senaryoların gerçekleşmesi durumunda hat akış değişimlerini ve baralardaki değişimleri gözlemlemektir. Çalışmanın katkıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- 1) Geliştirilen platformda kullanıcıya hitap etmek için PyQt eklentisi ile çeşitli komponentler görselleştirilerek arayüz tasarlanmıştır.
- 2) IEEE 14 baralı test sistemine farklı yük ve güç kaynağı eklediğinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Baralardaki güç, gerilim, açı değişimleri ve hat akışlarının değişimleri incelenmiştir.

Önerilen modelde kullanılan güç akışına ait matematiksel formülasyonun adımları, sistemin çalışma mantığı, Python programında PyQt eklentisinden aktarılan arayüzde görülen sonuçları Bölüm 2'de detaylandırılmıştır. Sonrasında Python programlama dili kullanılarak oluşturulan farklı durum çalışmalarına ait test ve analizlerin sonuçları Bölüm 3'te değerlendirilmiştir. Sonuç olarak Bölüm 4'te çalışma özetlenmiş ve gelecek çalışmaya ait planlar belirtilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Yük akışı analizi için veriler; baraların, iletim hatlarının ve trafo bilgilerinin toplanmasından oluşmaktadır. Bir güç sisteminde her bara gerilim genliği ($|V|$), faz açısı (δ), aktif güç (P) ve reaktif güç (Q) olmak üzere dört büyüklük ile tanımlanmaktadır. Her bir barada bu değerlerden son ikisi giriş olarak tanımlanmaktadır. İlk iki bilinmeyen yük akışı analizinden sonra hesaplanmaktadır. Bir güç sisteminin modellenmesi sırasında baralar salınım baraları, yük baraları ve gerilim kontrollü baralar olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir sistemde yalnızca bir salınım barası bulunmakta ve bu bara genellikle bir numaralı bara olarak tanımlanmaktadır. Bu baraya ilişkin gerilimin ($V \angle \delta_1$) genliği ve açısı belirtilmekte ve yük akışından sonra net aktif ve reaktif güç değerleri (P_1, Q_1) hesaplanmaktadır. Yük baraları için giriş bilgileri P_k ve Q_k biçiminde gösterilmektedir. V_k ve δ_k değerleri analiz sonucunda hesaplanarak elde edilmektedir. Gerilim kontrollü baralarda ise giriş bilgileri P_k ve V_k şeklinde olup, analiz sonucunda Q_k ve δ_k değerleri hesaplanmaktadır. P_k ve Q_k değerleri (1) ve (2) numaralı denklemlerde verilen eşitlikler ile hesaplanmaktadır (Glover vd., 2012; Saadat, 2002).

$$P_k = P_{Gk} - P_{Lk}, \quad \forall k \quad (1)$$

$$Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk}, \quad \forall k \quad (2)$$

Denklemden P_{Gk} ve Q_{Gk} ifadelerindeki k değeri ilgili bara numarasını belirtmektedir. P_{Gk} ve Q_{Gk} , bu baraya bağlı generatörün aktif ve reaktif gücünü, P_{Lk} ve Q_{Lk} ise baraya bağlı yükün aktif ve reaktif gücünü göstermektedir. İlgili k barasındaki karmaşık güç ifadesi denklem (3)'te ifade edilmiştir (Saadat, 2002).

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k I_k^*, \quad \forall k \quad (3)$$

Reel ve imajiner kısımları sırasıyla (4) ve (5) denklemlerinde görülmektedir. Güç akışı için Newton-Raphson çözümleri (4) ve (5) denklemlerinde verilen doğrusal olmayan güç akışı denklemlerine dayanmaktadır.

$$P_k = V_k \sum_{n=1}^N V_n [G_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n) + B_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n)], \quad \forall k, \forall n \quad (4)$$

$$Q_k = V_k \sum_{n=1}^N V_n [G_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n) - B_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n)], \quad \forall k, \forall n \quad (5)$$

$V_n = n$. baranın gerilimi

$V_k = k$. baranın gerilimi

$\delta_{kn} = k$. ve n . baraların faz açıları

$P_k = k$. baranın aktif gücü

$Q_k = k$. baranın reaktif gücü

$G_{kn}, B_{kn} = k$ barasından n barasına bara admitans matrisinin gerçekte ve sanal kısmı

$k = \{1, 2, 3, \dots, N\}$

$N =$ Sistemdeki baraların toplam sayısı

Yukarıdaki denklemlerin başlangıç tahminleri civarında Taylor serilerine açarsak ve yüksek dereceli terimleri ihmal edersek, denklem (6) gibi denklem takımları oluşmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2(i) \\ \vdots \\ \Delta Q_N(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2^n}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2^n}{\partial \delta_N} \right)^{(0)} & \left| & \left(\frac{\partial P_2^n}{\partial V_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2^n}{\partial V_N} \right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_N^n}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_N^n}{\partial \delta_N} \right)^{(0)} & \left| & \left(\frac{\partial P_N^n}{\partial V_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_N^n}{\partial V_N} \right)^{(0)} \\ \hline \left(\frac{\partial Q_2^n}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2^n}{\partial \delta_N} \right)^{(0)} & \left| & \left(\frac{\partial Q_2^n}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2^n}{\partial \delta_N} \right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_N^n}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_N^n}{\partial \delta_N} \right)^{(0)} & \left| & \left(\frac{\partial Q_N^n}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_N^n}{\partial \delta_N} \right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta(i) \\ \vdots \\ \Delta V(i) \end{bmatrix}, \quad \forall k, \forall n \quad (6)$$

Yukarıdaki denklemde 1 numaralı bara salınım barası olmasından dolayı yer almamıştır. Jakoben matris, gerilim açısındaki $\Delta \delta(i)$ ve gerilim genliğindeki $\Delta V(i)$ küçük değişimleri ile aktif güçlerdeki $\Delta P_k(i)$ ve reaktif güçlerdeki $\Delta Q_k(i)$ küçük değişimleri arasındaki lineerleştirilmiş ilişkiyi vermektedir. Jakoben matrisinin elemanları (4) ve (5) denklemlerinin $\Delta \delta_k(i)$ ve $\Delta V_k(i)$ 'deki değerlerinin kısmi türevleridir. Denklem (7)'de özet ifadesi görülmektedir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P(i) \\ \vdots \\ \Delta Q(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & & J3 \\ - & - & - \\ J2 & & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta(i) \\ \vdots \\ \Delta V(i) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Gerilim kontrollü baralar için gerilim büyüklükleri bilinmektedir. Bu sebeple gerilim kontrollü bara sayısı kadar, $\Delta \delta$ ve ΔV 'nin dahil olduğu denklem ve jakoben matriste karşılık düşen sütunlar silinmiştir. J_1 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları (8) ve (9) denklemlerinde görülmektedir.

$$J1_{kn} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_n} = V_k Y_{kn} V_n + \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (8)$$

$$J1_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_n} = - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n + \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (9)$$

Ayrıca, J_2 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları (10) ve (11) denklemlerinde görülmektedir.

$$J2_{kn} = \frac{\partial P_k}{\partial V_n} = V_k Y_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (10)$$

$$J2_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k Y_{kk} \cos \theta_{kk} + \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (11)$$

J_3 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları (12) ve (13) denklemlerinde görülmektedir.

$$J3_{kn} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_n} = -V_k Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (12)$$

$$J3_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = V_k \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (13)$$

J_4 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları (14) ve (15) denklemlerinde görülmektedir.

$$J4_{kn} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_n} = V_k Y_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (14)$$

$$J4_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k Y_{kk} \sin \theta_{kk} + \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (15)$$

$\Delta P_k(i)$ ve $\Delta Q_k(i)$ terimleri belirlenen ve hesaplanan değerler arasındaki fark olup, güç kalanları olarak bilinir. Denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\Delta P_k(i) = P_k^{tahmin} - P_k(i), \quad \forall k \quad (16)$$

$$\Delta Q_k(i) = Q_k^{tahmin} - Q_k(i), \quad \forall k \quad (17)$$

Gerilim baraları için yeni tahmini değerler aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$\delta_k(i+1) = \delta_k(i) + \Delta \delta_k(i), \quad \forall k \quad (18)$$

$$V_k(i+1) = V_k(i) + \Delta V_k(i), \quad \forall k \quad (19)$$

Bu çalışmada geliştirilen güç akış eğitim platformun çözümü için yukarıdaki denklemlerden faydalanılmıştır. Yük akış çözümü için gerekli prosedür sırasıyla bu kısımda anlatılmıştır. Yük baralarında P_k^{tahmin} ve Q_k^{tahmin} bilinmektedir. Gerilim büyüklükleri ve faz açıları ise salınım barası değerlerine eşitlenmiş ve $V_k(0)=1$ p.u ve $\delta_k(0) = 0$ olmuştur. Gerilim kontrollü baraların V_k ve P_k^{tahmin} değerleri bilinmektedir. Faz açıları ise salınım barası değerlerine eşitlenmiştir. Böylece $\delta_k(0) = 0$ olmuştur. Yük baralarında ise, $P_k(i)$ ve $Q_k(i)$ değerleri sırasıyla

(4) ve (5) denklemlerinden hesaplanmaktadır. Yine yük baralarında $\Delta P_k(i)$ ve $\Delta Q_k(i)$ değerleri ise sırasıyla (16) ve (17) denklemlerinden hesaplanmaktadır. Gerilim kontrollü baralarda ise, $P_k(i)$ ve $\Delta P_k(i)$ değerleri sırasıyla (4) ve (16) denklemlerinden hesaplanmaktadır. Jakoben matrisinin $J1, J2, J3$ ve $J4$ elemanları sırasıyla (8)-(15) denklemlerinden hesaplanmaktadır. Eşitlik (7) lineer denklemi çözüldükten sonra yeni faz açıları ve gerilim büyüklük değerleri sırasıyla (18) ve (19) denklemlerinden çözülmektedir. İşlem $\Delta P_k(i)$ ve $\Delta Q_k(i)$ kalanlarının belirli bir hassasiyete kadar devam etmesinden sonra ϵ toleransı elde edilene kadar devam etmektedir. ϵ toleransı elde edilince yük akış iterasyonu durdurulmaktadır. Sonuç olarak, bara gerilimleri ve faz açılarıyla, baralardaki güç değerleri elde edilmiştir. Son olarak baralar arasındaki aktif güç akış ve reaktif güç akış hesaplamaları sırasıyla (20) ve (21) denklemlerinden bulunmuştur. Böylece, hatlardaki güç akış değerleri de elde edilmiştir.

$$P_{kn} = |V_k|^2 G_{kn} - |V_k||V_n|(G_{kn} \cos \delta_{kn} + B_{kn} \sin \delta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (20)$$

$$Q_{kn} = -|V_k|^2 B_{kn} - |V_k||V_n|(G_{kn} \sin \delta_{kn} - B_{kn} \cos \delta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (21)$$

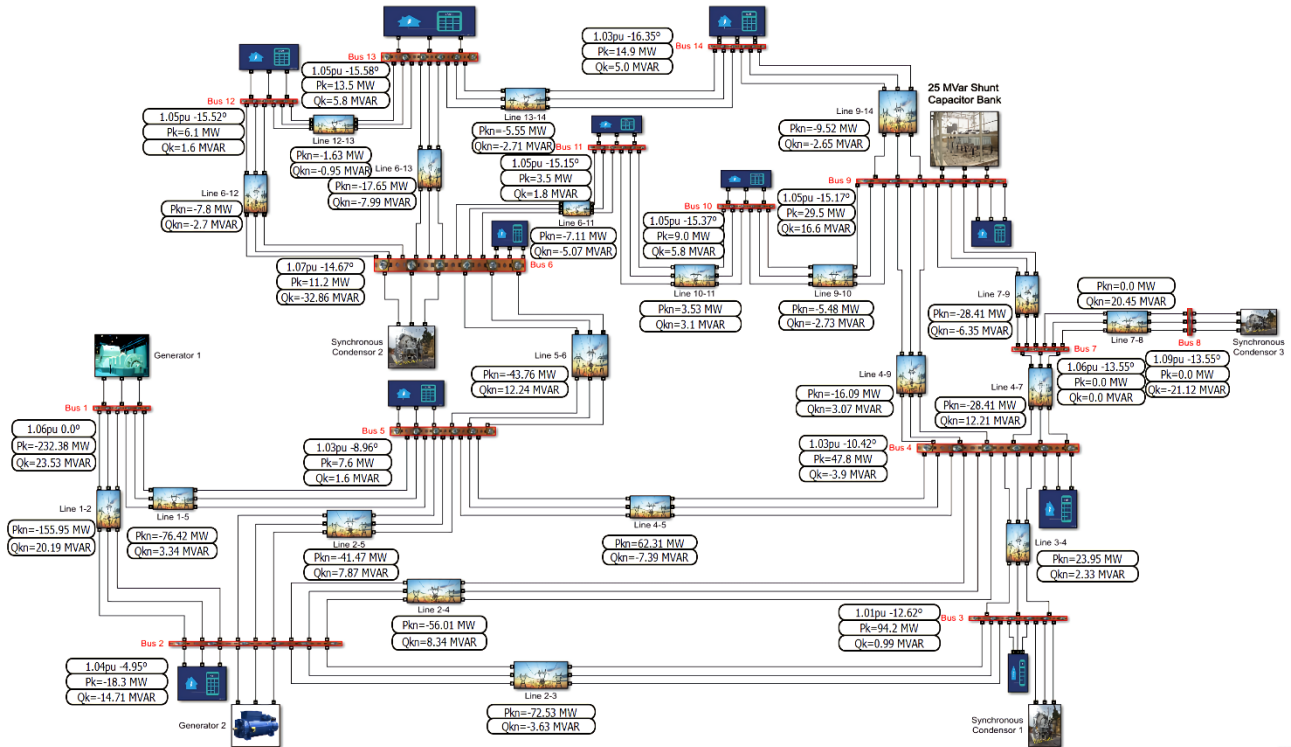
2.2. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Güç akış eğitim aracı olarak tasarlanan modelde, dizi benzeri hesaplamalar yapmak için Python yazılım dilinin NumPy kütüphanesi kullanılmıştır [19]. NumPy kütüphanesi ile matematik ifadeler kolayca dizilere dönüştürülmekte ve hesaplanmaktadır. Programın geliştirme aşamasında şebeke bileşenleri bir generatör, bara, senkron kompansatörler, kapasitör grubu, hat ve yükten oluşmaktadır. Kompansatörler şebekedeki reaktif gücü dengelemek için çok önemlidir. Reaktif güç gerilim dengesini sağlamak için belli bir seviyede tutulmaktadır. Geliştirilen modelin hızlı çalışması için gereksiz kütüphane kullanımından kaçınılmıştır. Algoritmayı özetlemek gerekirse; ilk önce modele veri girişi sağlanmaktadır. Daha sonra, sistemin admitans matrisi ve jakoben matrisi oluşturulmaktadır. Ardından jakoben matrisini ve güç uyumsuzlukları değiştirilmektedir. Bara gerilimleri sisteme yüklendikten sonra yakınsamanın sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmektedir. Eğer yakınsama sağlanırsa bara gerilimi, gerilim faz açıları ve hatlarda meydana gelen güç akışı bilgileri çıktı olarak alınmaktadır. Eğer yakınsama sağlanmazsa jakoben matrisi ve güç denklem uyumsuzlukları tekrar değiştirilmektedir. Algoritma akış diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Güç Akış Eğitim Platformu Algoritma Akış Diyagramı (Power Flow Education Platform Algorithm Flowchart)

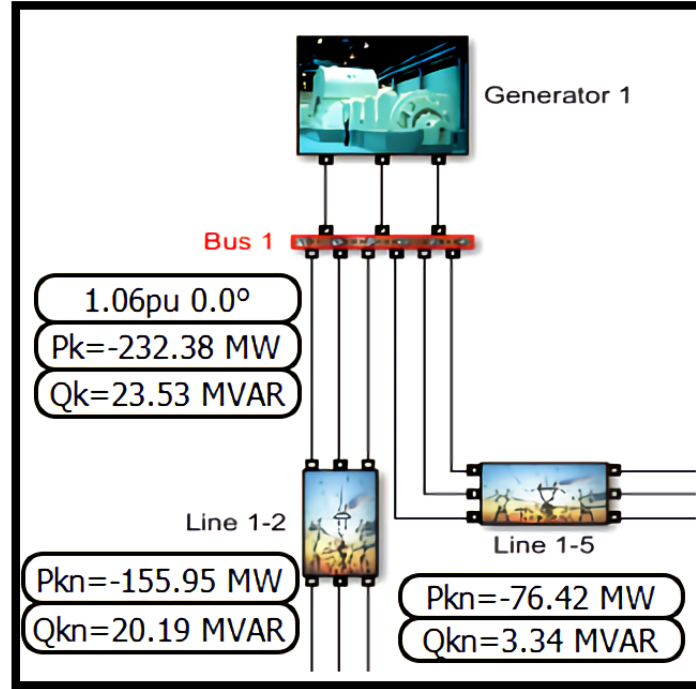
Bu çalışma kapsamında IEEE 14 baralı test sistemi genel güç sistemi olarak ele alınmıştır. Test verileri ile güç akışı analizi yapılarak modellenen eğitim platformu test edilmiştir. Bir diğer önemli nokta olan durma koşulları bu bölümde anlatılmıştır. Son olarak arayüz uygulamasından bahsedilmiştir. Program oluşturulduktan sonra baralar ve iletim hatları üzerindeki görsel okuma sayaçları sayesinde elde edilen veriler arayüzde görüntülenmiştir. IEEE 14 baralı test sistemi verileri Python’da işlenmiş ve ilgili veriler, IEEE Ortak Veri Formatına göre değerlendirilmiştir [20]. Bu veri formatı, bara verileri ve iletim hattı verileri olarak ikiye ayrılır ve sütunlar, güç akışı analizi için gereken veri türlerini temsil etmektedir. TXT formatındaki dosyada saklanan veriler yazılım çalışmasında kullanılmıştır. Yazılım dosyasının bulunduğu klasörde olan veriler programa aktarılmıştır. Ardından listelere dönüştürülmüştür. Aktarılan veriler, karşılık gelen matematiksel ifadelerle ilişkilendirilerek güç akışı çözümleri elde edilmiştir. Durdurma koşulunu kontrol etmek için tolerans değeri 10^{-5} olarak girilmiştir. Bir sonraki kökten önceki kök çıkarılarak mutlak değeri alınmıştır. Bu değer tolerans değerinden küçük olduğunda işlem durmaktadır. Algoritmanın başlangıcında iterasyon sayısı sıfır olarak tanımlanmış olup sonunda ise iterasyon sayısı bir artmaktadır. Böylece, program sonuca ulaşmak için her sondan başa dönüşte iterasyon sayısını bir arttırmaktadır. IEEE 14 baralı test sistemi 21 iterasyon sonra sonlandırılmıştır. Sonuca ulaşılan bu iterasyon sayısı modelin hızlı ve etkili çalıştığını göstermektedir.



Şekil 2. Güç Akışı Eğitim Platformu Genel Görünümü (Overview of the Power Flow Education Platform)

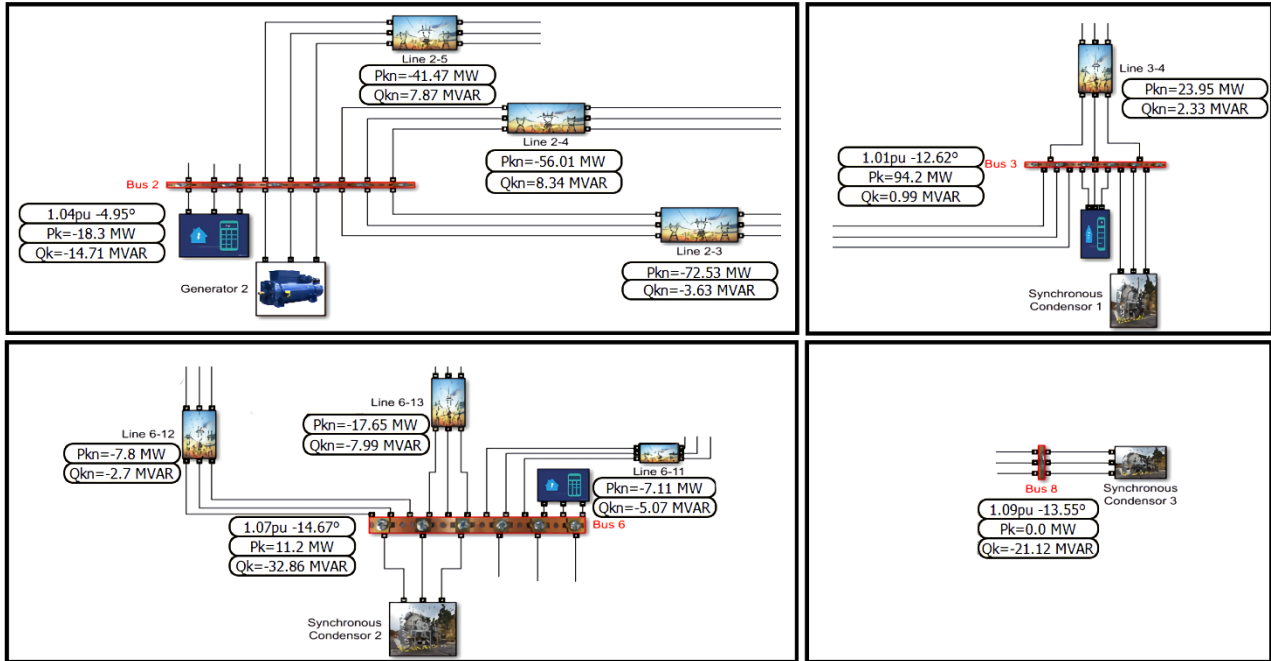
Güç akışı eğitim aracı arayüzü PyQt bileşeni ile oluşturulmuştur. Program, baraların aktif gücünü, reaktif gücünü, açısını, gerilimini ve baralar arasındaki güç akışlarını göstermektedir. Arayüzün arkasında 14 baralı sistemin MATLAB üzerinde çizilmiş halinin bir resmi yer almaktadır. Baraların ve iletim hatlarının yanında veya üzerinde satır düzenlemeler (LineEdits) oluşturulmuştur. Bu şekilde, yazılımdan gelen bilgiler burada kolayca görüntülenebilmektedir. Bu adım kullanılabilirlik açısından önemlidir. Arayüz, yazılım tarafında kolayca değiştirilebilmekte ve bu modele kolayca aktarılabilir. Test sisteminin arka plan görüntüsü, program kodu ve Python üzerindeki arayüz kodu ayrı ayrı şablonlarda ele alınmıştır. Diğer şablonlar, arayüz şablonuna kod ile aktarılarak nihai sonuç alınmıştır. Arkada koşan programın ardından arayüz ekranında güç akışları, aktif ve reaktif güçler, gerilimler ve açılar görülmektedir. Aktif güç ve reaktif güç sırasıyla P_k ve Q_k ile gösterilmiştir. Baralar arası aktif güç akışı ise sırasıyla P_{kn} ve Q_{kn} ile gösterilmiştir. Gerilim ve açı ise baraların yanında en üstte yer almaktadır. Geliştirilen eğitim platformunun genel görünümü Şekil 2’de görülmektedir.

İlk olarak IEEE 14 baralı test sisteminin sonuçları burada yer almaktadır. Salınım barası sistem üzerinde tüketilen (kayıp) aktif ve reaktif gücü bulmak için kullanılmaktadır. Modeldeki salınım barası Şekil 3’te görüntülenmektedir.

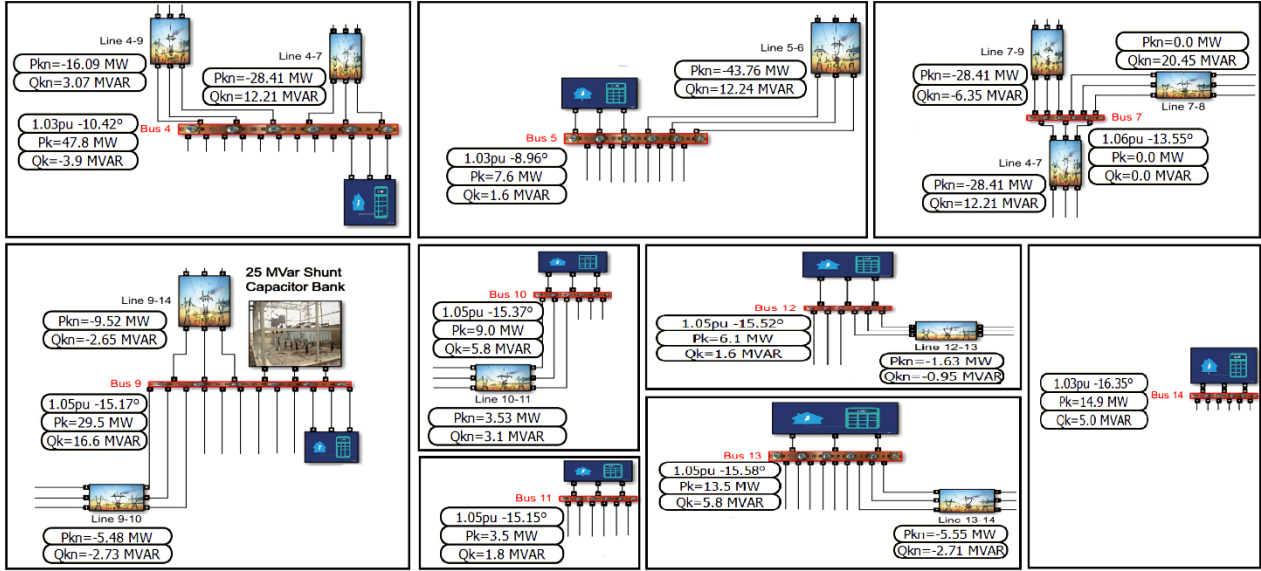


Şekil 3. Salınım Barası (Slack Bus)

Gerilim kontrollü baralar, baranın reaktif gücünü ve açısını bulmak için kullanılmaktadır. Gerilimi ve aktif gücü bilinmektedir. Platformdaki 14 baralı sistemde 4 adet gerilim kontrollü bara bulunmakta olup Şekil 4'te gerilim baraları ve test sisteminde elde edilen sonuçlar görülmektedir. Yük baralarında ise gerilim ve açı değerleri hesaplanmaktadır. Bahsi geçen baralardaki aktif ve reaktif güçler bilinmektedir. Platformdaki 14 baralı sistemde 9 adet yük barası bulunmakta olup ilgili yük baraları ve test sisteminde elde edilen sonuçları Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Gerilim Kontrollü Baralar (Voltage-Controlled Buses)



Şekil 5 Yük Baraları (Load Buses)

3. Simülasyon Sonuçları (Simulation Results)

Geliştirilen güç akışı eğitim aracının test edilmesi için farklı durum çalışmaları analiz edilmiş ve modelin ayrıca arayüzün doğru çalıştığının ispatlanması amaçlanmıştır. Oluşturulan durum çalışmalarının detayları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- **Temel Durum:** IEEE 14 baralı test sisteminin doğrudan güç akışı analizi
- **Durum-1:** IEEE 14 baralı test sisteminin 3 numaralı barasına Rüzgâr türbini ve yeni bir yük bağlanması
- **Durum-2:** IEEE 14 baralı test sisteminin 13 numaralı barasına Mikronize Öğütme tesisi bağlanması

Öncelikle Temel Durum analizi olan IEEE 14 baralı test sisteminde var olan yük, generatör, kompanseör ve iletim hatları kullanılarak güç akışı gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda her bir baranın gerilim ve açı değerleri, aktif ve reaktif güçleri elde edilmiştir. Tablo 1'de her bir bara için güç akışı analiz sonuçları görülmektedir. Ayrıca Tablo 1'deki sonuçlardan iletim kaybının 13,38 MW olduğu saptanmıştır. İletim kayıpları, sistemin kalitesine bağlı teknik kayıplardan ve son kullanıcıya bağlı teknik olmayan kayıplardan kaynaklanabilmektedir. Tablo 2'de ise Temel Durum analizinde elde edilen baralar arasındaki iletim hatlarında meydana gelen aktif ve reaktif güç akışları gösterilmektedir. İlgili tabloda güç akışları numarası küçük baradan büyük numaralı baraya doğru gösterilmiştir (tersi yönde akış olması durumunda güç değeri "+" ile ifade edilmektedir).

Tablo 1. IEEE 14 Baralı Test Sistemi Bara Değerleri (IEEE 14-Bus Test System Bus Values)

Bara #	Gerilim [p.u.]	Faz Açısı	Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVAR]
1	1,06	0,0	-232,38	23,53
2	1,04	-4,95	-18,3	-14,71
3	1,01	-12,62	94,2	0,99
4	1,03	-10,42	47,8	-3,9
5	1,03	-8,96	7,6	1,6
6	1,07	-14,67	11,2	-32,86
7	1,06	-13,55	0,0	0,0
8	1,09	-13,55	0,0	-21,12
9	1,05	-15,17	29,5	16,6
10	1,05	-15,37	9,0	5,8
11	1,05	-15,15	3,5	1,8
12	1,05	-15,52	6,1	1,6
13	1,05	-15,58	13,5	5,8
14	1,03	-16,35	14,9	5,0

Tablo 2 IEEE 14 Baralı Test Sistemi Hat Akışları (IEEE 14-Bus Test System Line Flows)

Akış Hattı (...baradan ...baraya)		Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVar]
1	2	-155,95	20,19
1	5	-76,42	3,34
2	3	-72,53	-3,63
2	4	-56,01	8,34
2	5	-41,47	7,87
3	4	23,95	2,33
4	5	62,31	-7,39
4	7	-28,41	12,21
7	9	-28,41	-6,35
9	10	-5,48	-2,73
9	14	-9,52	-2,65
10	11	3,53	3,1
12	13	-1,63	-0,95
13	14	-5,55	-2,71
4	9	-16,09	3,07
5	6	-43,76	12,24
6	11	-7,11	-5,07
6	12	-7,8	-2,7
6	13	-17,65	-7,99
7	8	0,0	20,45

Geliştirilen modelin ve arayüzün test edilmesi için ele alınan bir diğer durum çalışması Durum-1'dir. Durum-1'de IEEE 14 baralı test sisteminin 3 numaralı gerilim kontrollü barasındaki bileşenler çıkarılarak yerine üretim birimi olarak rüzgâr türbini ve ayrıca bir yük eklenmiştir. Tablo 3'te eklenen yük talebi ve rüzgâr türbinine ait üretim değerleri görülmektedir.

Tablo 3. Rüzgâr Türbini Bara Değerleri (Wind Turbine Bus Values)

Bara#	Gerilim [p.u.]	Yük [MW]	Üretim [MW]
3	1.0	181	-184

Durum-1'in güç akışı analizine ait baralar ve iletim hatlarına dair sonuçlar sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir. İlgili tablolar incelendiğinde güç akışı sonucunda rüzgâr türbininin çok fazla reaktif güç tükettiği görülmektedir. Tablo 4'te 3 numaralı barada 44.37 MVar reaktif güç çekildiği görülmektedir. Rüzgâr türbinleri çift beslemeli asenkron generatörlere sahip oldukları için çok fazla reaktif güç talebinde bulunmaktadır. Bunun nedeni, asenkron generatörün devreye girmesi sırasında ihtiyaç duyulan elektromanyetik alanı oluşturmak için reaktif güç talebinin olmasıdır. Ayrıca sonuçlardan da anlaşıldığı gibi rüzgâr türbini tarafından üretilen aktif güç nedeniyle salınım barasından temin edilen aktif gücün de azaldığı gözlemlenmiştir. Yük baralarındaki güç tüketimi yüklerin sabit kalmasından dolayı değişmemektedir.

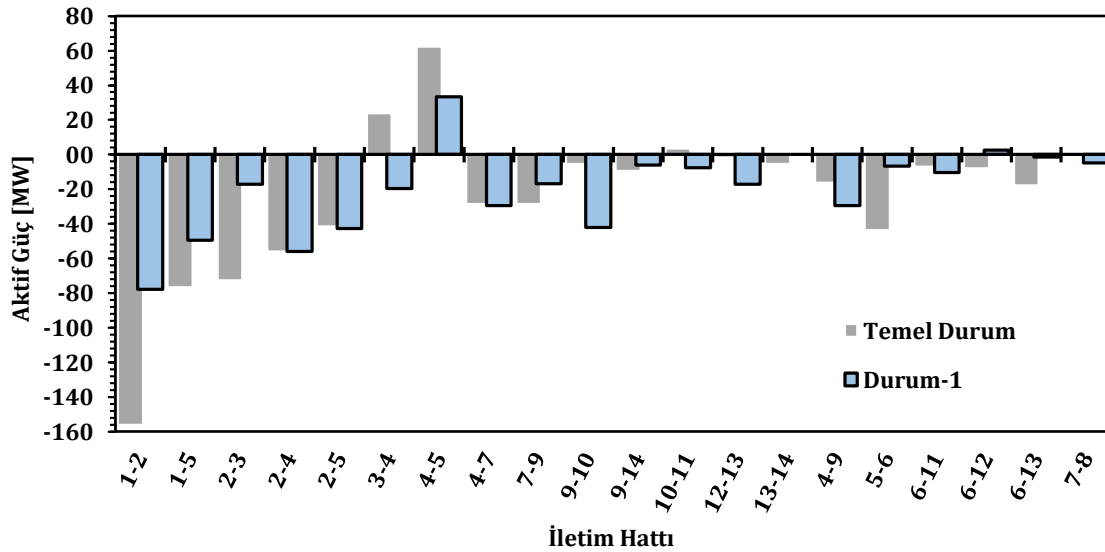
Tablo 4. 14 Baralı Test Sistemine Rüzgâr Türbini Ekledikten Sonra Bara Değerleri (Bus Values after after integrating a Wind Turbine into the IEEE 14-Bus Test System)

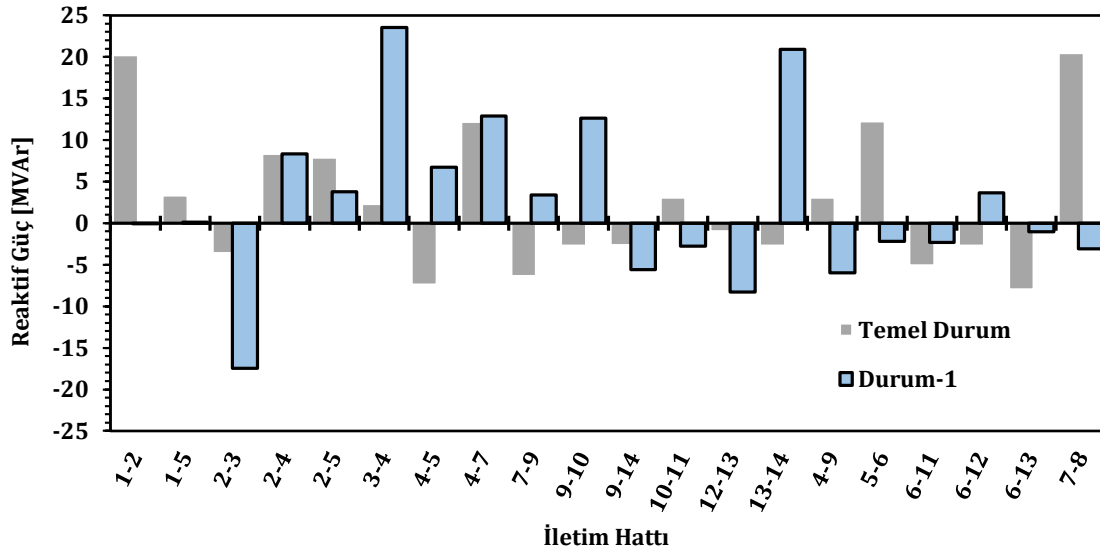
Bara #	Gerilim [p.u.]	Faz Açısı	Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVar]
1	1,06	0,0	-127,26	0,09
2	1,04	-2,35	-18,3	-5,02
3	1,0	-3,68	-3,0	44,37
4	1,03	-6,42	47,8	-3,9
5	1,03	-5,72	7,6	1,6
6	1,07	-11,2	11,2	-33,82
7	1,06	-9,69	0,0	0,0
8	1,09	-9,69	0,0	-21,59
9	1,05	-11,37	29,5	16,6
10	1,05	-11,63	9,0	5,8
11	1,05	-11,54	3,5	1,8
12	1,05	-12,03	6,1	1,6
13	1,05	-12,06	13,5	5,8
14	1,03	-12,68	14,9	5,0

Tablo 5. 14 Baralı Test Sistemine Rüzgâr Türbini Ekdikten Sonra Hat Akışları (Line Flows after integrating a Wind Turbine into the IEEE 14-Bus Test System)

Akış Hattı (...baradan ...baraya)		Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVar]
1	2	-77,95	-0,04
1	5	-49,61	0,13
2	3	-17,03	-17,46
2	4	-56,01	8,34
2	5	-42,65	3,8
3	4	-19,74	23,56
4	5	33,27	6,74
4	7	-29,54	12,89
4	9	-16,72	3,38
5	6	-41,98	12,63
6	11	-6,01	-5,61
6	12	-7,67	-2,79
6	13	-17,1	-8,26
7	8	0,0	20,9
7	9	-29,54	-5,95
9	10	-6,57	-2,18
9	14	-10,2	-2,29
10	11	2,44	3,66
12	13	-1,5	-1,05
13	14	-4,88	-3,09

Elde edilen sonuçların daha anlamlı olması amacıyla Temel Durum ve Durum-1'e ait güç akışı sonucu iletim hatlarında meydana gelen aktif ve reaktif güç akışları karşılaştırmaları Şekil 6 ve Şekil 7'de sağlanmıştır. Şekil 6'da görüldüğü üzere 3 numaralı barada rüzgâr türbini devreye alınmasından sonra hatlarda akmakta olan aktif güçte özellikle 3 numaralı bara ile ilişkili olan baralarda önemli değişimler görülmektedir. Hatta Temel Durum'da Bara 4'ten Bara 3'e güç akışı gerçekleşirken, Durum-1'de güç akışı Bara 3'ten Bara 4'e doğru daha yüksek miktarda gerçekleştiği görülmektedir. Hatlar üzerinde meydana gelen reaktif güç akışları da Şekil 7'de gösterilmiş olup rüzgâr türbinin reaktif güç etkisi nedeniyle yine iki durum arasında önemli farklar göze çarpmaktadır. Bu analizler sayesinde sistem üzerinde meydana gelen değişimlerde iletim hatlarının kapasitesine göre ne kadarlık gücün devreye alınması gerektiği ya da devreden çıkarılması gerektiği tespit edilebilmekte ya da buna bağlı olarak sistem üzerinde kapasitesinin artırılması gereken bileşenlerin neler olabileceği belirlenebilmektedir.

**Şekil 6.** Temel Durum ve Durum-1 için güç akışı sonucunda iletim hatlarında meydana gelen aktif güç akışlarının karşılaştırılması (Comparison of active power flows in transmission lines as a result of power flow for Base Case and Case-1)



Şekil 7. Temel Durum ve Durum-1 için güç akışı sonucunda iletim hatlarında meydana gelen reaktif güç akışlarının karşılaştırılması (Comparison of reactive power flows in transmission lines as a result of power flow for Base Case and Case-1)

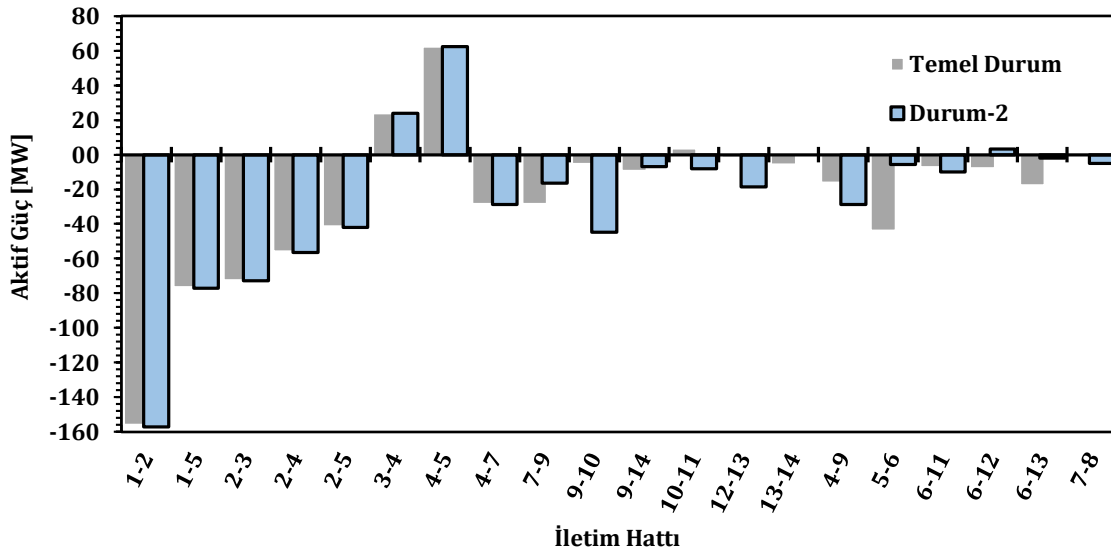
Tablo 6. 14 Baralı Test Sistemine Mikronize Öğütme Tesisi Eklendikten Sonra Bara Değerleri (Bus Values after Adding a Micronised Grinder to the IEEE 14-Bus Test System)

Bara #	Gerilim [p.u.]	Faz Açısı	Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVar]
1	1,06	0,0	-234,17	23,72
2	1,04	-4,99	-18,3	-15,26
3	1,01	-12,68	94,2	0,85
4	1,03	-10,5	47,8	-3,9
5	1,03	-9,03	7,6	1,6
6	1,07	-14,89	11,2	-33,76
7	1,06	-13,68	0,0	0,0
8	1,09	-13,68	0,0	-21,19
9	1,05	-15,31	29,5	16,6
10	1,05	-15,52	9,0	5,8
11	1,05	-15,33	3,5	1,8
12	1,05	-15,76	6,1	1,6
13	1,05	-15,84	15,1	6,3
14	1,03	-16,55	14,9	5,0

Gerçekleştirilen bir diğer durum analizi Durum-2'de ise 13 numaralı baradaki yük üzerine mikronize öğütme tesis yükü devreye alınmıştır. Bünyesinde 58 adet elektrikli motor bulunan bu tesis 0.95 güç faktörü ile işletilmekte olup 1.6 MW aktif güç ve 0.52 MVar reaktif güç tüketimi talep etmektedir. Bu veriler ışığında IEEE 14 baralı test sisteme 13 numaralı baraya yük olarak 1.6 MW aktif güç ve 0.52 MVar reaktif güç eklenmiştir. Sistemdeki yük değerinin artmasına bağlı olarak hatlarda meydana gelen kayıplardaki artıştan dolayı salınım barasından çekilen aktif güç de artmıştır. Sonuç olarak küçük ölçüde bir tesis eklendiğinde sistemde kritik değer değişimleri meydana gelmektedir. Bara değerleri ve hatlar üzerinde meydana gelen güç akışları sırasıyla Tablo 6 ve Tablo 7'de görülmektedir. Şekil 8 ve Şekil 9 yardımıyla 13 numaralı barada devreye alınan mikronize öğütme tesisinin hatlardaki aktif ve reaktif güç akışına nasıl etki ettiği yorumlanabilmektedir. Aktif güç akışları Şekil 8'den gözlemlendiğinde 13 numaralı bara ile ilişkili olan baralar ve bu baralar ile komşu baralar arasındaki aktif güç akışı artmıştır. Yine hatlar üzerinde dolaşımda olan reaktif güç değerleri 13 numaralı baraya eklenen yük nedeniyle özellikle ilgili baralar arasında bulunan hatlarda gözle görülür değişimler meydana getirmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak güç sistemi bileşenleri (transformatör, iletim hatları, kesiciler ve diğer koruma ekipmanları) üzerinde meydana gelen stresi azaltma amacıyla uygun bölgelere kompanseörler yerleştirilebilir ve güç kalitesi artırılabilir.

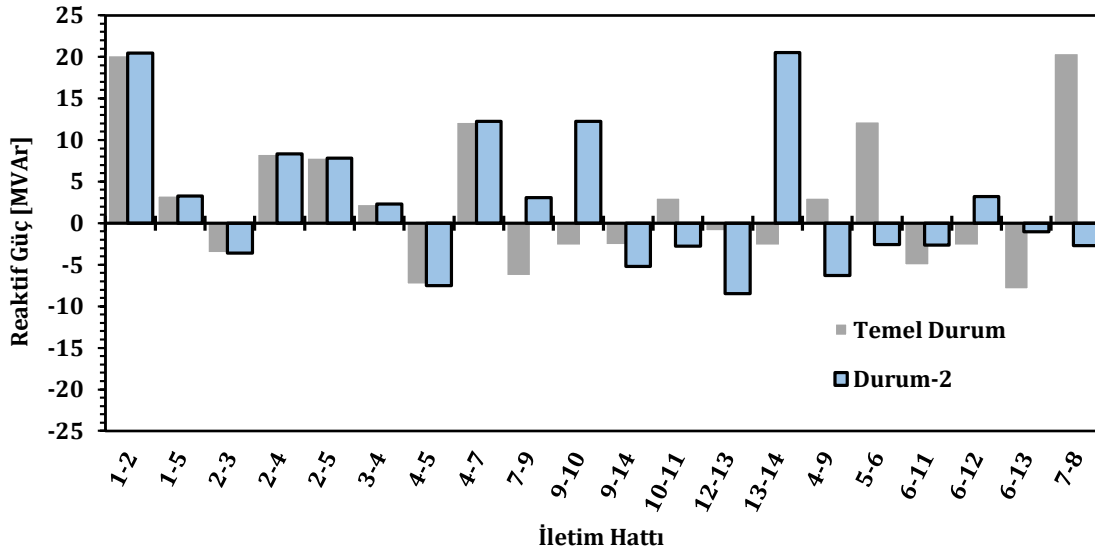
Tablo 7. 14 Baralı Test Sistemine Mikronize Öğütme Tesisi Ekledikten Sonra Hat Akışları (Line Flows after Adding a Micronised Grinder to the IEEE 14-Bus Test System)

Akış Hattı (...baradan ...baraya)		Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVar]
1	2	-157,1	20,45
1	5	-77,08	3,26
2	3	-72,75	-3,61
2	4	-56,44	8,3
2	5	-41,9	7,81
3	4	23,75	2,27
4	5	62,3	-7,5
4	7	-28,8	12,26
4	9	-16,3	3,08
5	6	-44,79	12,25
6	11	-6,88	-5,19
6	12	-8,07	-2,78
6	13	-18,64	-8,47
7	8	0,0	20,52
7	9	-28,8	-6,33
9	10	-5,71	-2,61
9	14	-9,89	-2,67
10	11	3,3	3,22
12	13	-1,89	-1,02
13	14	-5,18	-2,7

**Şekil 8.** Temel Durum ve Durum-1 için güç akışı sonucunda iletim hatlarında meydana gelen aktif güç akışlarının karşılaştırılması (Comparison of active power flows in transmission lines as a result of power flow for Base Case and Case-1)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışma kapsamında elektrik güç sistemlerinde güç akışı analizi incelenmiş ve bu doğrultuda ilgili alandaki mühendislik öğrencileri için bir eğitim aracı sunulmuştur. Önerilen model için ayrıca kullanıcı dostu arayüz tasarlanmıştır. IEEE 14 baralı test sistemi temel alınarak güç akışı analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar arayüz ekranında ilgili kısımda yer alan kutucuklar üzerinde bara gerilim ve açıları, aktif/reaktif güç değerleri ve iletim hatlarında meydana gelen aktif/reaktif güç akışları gösterilmiştir. İlgili modelin ve arayüzün işlevselliğini test etmek amacıyla IEEE 14 baralı test sistemi üzerinde iki farklı baraya farklı üretim ve tüketim birimleri eklenerek durum analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Bu kapsamda Durum-1'de sisteme 3 numaralı bara üzerinden bir rüzgar türbini ve yeni bir yük dahil edilmiştir. Bu durumda beklenildiği gibi baranın güç değerleri ve ilintili baralar arasındaki hatlar üzerinde akmakta olan güç değerleri ve yönleri değişmiştir. Ayrıca, rüzgar türbini generatörü nedeniyle Bara 3'ün reaktif güç talebi artmıştır. Bir sonraki durum çalışmasında ise 13 numaralı baraya bir mikronize öğütme tesisi yük olarak dahil edilmiş ve güç akışı tekrarlanmıştır. Beklendiği gibi ilgili baranın yük talebinin artmasıyla birlikte ilintili baralardan ilgili baraya aktif güç akışı gerçekleşmiştir. Sonuçlar bu model ve arayüzün doğru bir şekilde çalıştığını ispatlamaktadır.



Şekil 9. Temel Durum ve Durum-2 için güç akışı sonucunda iletim hatlarında meydana gelen reaktif güç akışlarının karşılaştırılması (Comparison of reactive power flows in transmission lines as a result of power flow for Base Case and Case-2)

Geliştirilen bu arayüz sayesinde farklı baralar üzerinden sisteme dahil edilebilecek yükler ve üretim birimlerinin sistem üzerinde nasıl bir etkisi olacağı gözlemlenebilecektir. Bu nedenle geliştirilen bu eğitim aracının teknoloji odaklı yetişen günümüz mühendislik öğrencilerinin güç akışı gibi önemli bir konuyu kavrama ve ilgi duyma noktasında önemli katkısı olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın devamı niteliğindeki çalışmada, hatlar üzerindeki güç akışlarının hareketli görsel ile akış yönleri gösterilmesi hedeflenmekte ayrıca iletim hat kapasiteleri, bara gelirim limitleri, sistem kayıp limitleri gibi güç sistemine ait kısıtlar tanımlanarak ve güç akışı gerçekleştirildikten sonra limit aşımalarında arayüzün ilgili bölgede uyarı vermesi sağlanacaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Chow, J. H., & Cheung, K. W., 1992, A toolbox for power system dynamics and control engineering education and research. IEEE transactions on Power Systems, 7(4), 1559-1564.
- Dzafic, I., Glavic, M., & Tesnjak, S., 2004, An object-oriented graphical package for power system simulation and analysis. In Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (IEEE Cat. No. 04CH37521) (Vol. 3, pp. 835-839). IEEE.
- Ekinci, S., Demiroren, A., & Zeynelgil, H. L., 2017, PowSysGUI: A new educational software package for power system stability studies using MATLAB/Simulink. International Journal of Electrical Engineering Education, 54(4), 283-298.
- Fernandes, T. R., Fernandes, L. R., Ricciardi, T. R., Ugarte, L. F., & de Almeida, M. C. (2018, September). Python Programming Language for Power System Analysis Education and Research. In 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D-LA) (pp. 1-5). IEEE.
- Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T., 2012, Power system analysis & design, Fifth Edition, Stamford.
- Group, W., 1973, "Common Format for Exchange of Solved Load Flow Data" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (Volume: PAS-92, Issue: 6, Nov. 1973)
- Hakim, L., Wahidi, M., Handoko, T., Gusmedi, H., Soedjarwanto, N., & Milano, F., 2014, Development of a power flow software for distribution system analysis based on rectangular voltage using python software package. In 2014 6th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) (pp. 1-5). IEEE.
- Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J. et al. Array programming with NumPy. Nature 585, 357-362 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- IRENA, 2020, Renewable Energy Statistics 2020 The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Islam, S., & Chowdhury, N., 2001, A case-based windows graphic package for the education and training of power system restoration. IEEE Transactions on Power Systems, 16(2), 181-187.
- Lai, H. Y., Mai, W., & Chung, C. Y. (2014, December). Educational simulation platform for micro-grid. In 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) (pp. 1-7). IEEE.
- Levi, V. A., & Nedic, D. P., 2001, Application of the optimal power flow model in power system education. IEEE Transactions on power systems, 16(4), 572-580.

- Liu, J., Salama, M. M. A., & Mansour, R. R., 2002, An efficient power flow algorithm for distribution systems with polynomial load. *International Journal of Electrical Engineering Education*, 39(4), 371-386.
- Milano, F., 2013, A Python-based software tool for power system analysis. In 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting (pp. 1-5). IEEE.
- Overbye, T. J., Sauer, P. W., Marzinzik, C. M., & Gross, G., 1995, A user-friendly simulation program for teaching power system operations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(4), 1725-1733.
- Saadat, H., 2002, *Power System Analysis*. Tata McGraw-Hill, New Delhi.
- Saygın, D., Bülent Tör, O., Teimourzadeh, S., Koç, M., Hildermeier, J., & Kolokathis, C., 2019, Transport sector transformation : Integrating electric vehicles into Turkey's distribution grids, [Online]. Available: <https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2019/12/Transport-sector-transformation.Integrating-electric-vehicles-into-Turkey's-distribution-grids.pdf>.
- Shin, J. R., Lee, W. H., & Im, D. H., 1999, A windows-based interactive and graphic package for the education and training of power system analysis and operation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(4), 1193-1199.
- Sidea, D. O., Bulac, C., & Boicea, V. A. (2017, May). Power engineering education toolbox for active power flow control using the phase-shifting transformer. In 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) (pp. 177-183). IEEE.
- Srikanth, P., Rajendra, O., Yesuraj, A., Tilak, M., & Raja, K. (2013). Load flow analysis of IEEE 14 bus system using matlab. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2(5), 149-155.
- T.E. Oliphant, "Python for Scientific Computing," *IEEE Computing in Science and Engineering*, Vol. 9, No. 3, May 2007, pp. 10-20
- Thurner, L., Scheidler, A., Schäfer, F., Menke, J. H., Dollichon, J., Meier, F., ... & Braun, M., 2018, pandapower—an open-source python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6), 6510-6521.
- Till Bunsen et al., 2019, Global EV Outlook 2019 to electric mobility, OECD iea.org, p. 232, 2019, [Online]. Available: www.iea.org/publications/reports/globalevoutlook2019.
- Turner, M., Foreman, C., & Sundararajan, R., 2014, Computer Simulation Tools to Enhance Undergraduate Power Systems Education. In 2014 ASEE Annual Conference & Exposition (pp. 24-307).
- Vournas, C. D., Potamianakis, E. G., Moors, C., & Van Cutsem, T., 2004, An educational simulation tool for power system control and stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(1), 48-55.
- Yu, D. C., Jarnal, N., Wang, W., Zang, X. G., & Brandt, J. R., 1994, A graphical user interface for design, simulation and analysis of power plant electrical auxiliary systems. *IEEE transactions on energy conversion*, 9(2), 263-269.



LAVANTA BİTKİSİ ÖZÜTÜ KULLANILARAK SiNH₂@FeNP NANOKOMPOZİTİNİN YEŞİL SENTEZİ İLE SULU ÇÖZELTİDEN METİLEN MAVİSİNİN GİDERİMİ: DENEYSEL TASARIM YAKLAŞIMI

M. Yunus PAMUKOĞLU¹, Bülent KIRKAN², Belgin YOLDAŞ^{1*}

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

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Su Enstitüsü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Metilen Mavisi (MM),
Nanokompozit,
Yeşil Sentez,
Lavanta Bitkisi,
Adsorpsiyon.

Öz

Bu çalışmada, lavanta bitkisi (*Lavandula angustifolia*) özütü kullanılarak yeşil sentez yöntemiyle sentezlenen SiNH₂@FeNP nanokompoziti ile sulu çözeltiden metilen mavisi (MM) boyar maddesinin giderilmesi Box-Behnken deneysel tasarım yöntemi uygulanarak incelenmiştir. Yeni sentezlenen bu malzeme ile sulu çözeltiden metilen mavisi gideriminde adsorpsiyon sürecini etkileyen çözelti pH'ı, adsorban dozu ve başlangıç boya konsantrasyonu parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Elde edilen SiNH₂@FeNP nanokompozitinin yapısı FTIR, SEM ve XRD teknikleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Deney tasarımı sonuçlarından elde edilen verilere göre, pH, başlangıç metilen mavisi konsantrasyonu ve adsorban dozaj değerleri sırasıyla 10, 42,7 mg/L ve 0,5 g/L'de tutulduğunda yaklaşık %75 metilen mavisi boya giderim veriminin elde edilebileceği belirlenmiştir. Bu veriler ışığında yeşil sentez metodu ile üretilen bu nanokompozitin çevre dostu, ucuz, uygulanabilirliği kolay ve etkili bir adsorban olduğu görülmektedir.

GREEN SYNTHESIS OF SiNH₂@FeNP NANOCOMPOSITE USING LAVENDER EXTRACT AND REMOVAL OF METHYLENE BLUE FROM AQUEOUS SOLUTION: EXPERIMENTAL DESIGN APPROACH

Keywords

Methylene Blue,
Nanocomposite,
Green Synthesis,
Lavender Plant,
Adsorption.

Abstract

In this study, the removal of methylene blue (MM) dyestuff from aqueous solution with SiNH₂@FeNP nanocomposite synthesized by green synthesis method using lavender plant (*Lavandula angustifolia*) extract was investigated by applying Box-Behnken experimental design method. The effect of solution pH, adsorbent dose and initial dye concentration parameters, which affect the adsorption process, on the removal of methylene blue from aqueous solutions with this newly synthesized material was investigated. The structure of the obtained SiNH₂@FeNP nanocomposite was characterized using FTIR, SEM and XRD techniques. According to the data obtained from the experimental design results, it was determined that approximately 75% methylene blue dye removal efficiency could be obtained when pH, initial methylene blue concentration and adsorbent dosage values were kept at 10, 42.7 mg/L and 0.5 g/L, respectively. In the light of these data, it is seen that this nanocomposite produced by the green synthesis method is an environmentally friendly, inexpensive, easy to apply and effective adsorbent.

Alıntı / Cite

Pamukoğlu, M.Y., Kırkan, B., Yoldaş, B., (2022). Lavanta Bitkisi Özütü Kullanılarak SiNH₂@FeNP Nanokompozitinin Yeşil Sentezi ile Sulu Çözeltiden Metilen Mavisinin Giderimi: Deneysel Tasarım Yaklaşımı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 272-285.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M.Y. Pamukoğlu, 0000-0003-3337-0860
B. Kırkan, 0000-0003-3462-0681
B. Yoldaş, 0000-0002-4104-3184

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	05.10.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	17.11.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	25.11.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

* İlgili yazar/ Corresponding author: belginbabaryoldas@gmail.com, +90-0246-313-3460

1. Giriş (Introduction)

Dünya çapında son on yılda nanoteknoloji araştırmaları hızla artmış ve nano ölçekli cihazların gelişimi ile daha gelişmiş sensörlerin ve yeni malzemelerin geliştirilmesine yol açmıştır.

Nanopartikül, parçacık boyutu 10 ila 100 nm arasında değişen mikroskobik bir parçacıktır (Kumar ve Rajeshkumar, 2018). Nanoteknoloji, gıda ambalaj malzemeleri, farmakoloji, biyomedikal bilimler (Nasrollahzadeh vd., 2019) ve kişisel bakım ürünlerinin yanı sıra katalizörler, ilaç taşıyıcıları (Kumar vd., 2016) gibi geniş bir uygulama alanına sahip bir bilim alanıdır. Son yıllarda, bilimsel araştırma ve uygulamalar açısından nanoteknoloji alanı güzel bir gelişme göstermiştir (Eren ve Baran, 2019; Erşan vd., 2020).

Nanoparçacıkların sentezi kimyasal, fiziksel ve biyolojik olarak üç farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir. Nanoparçacıkların biyolojik yöntemle sentezi, maliyet düşüklüğü, işlem kolaylığı, daha az kimyasal madde kullanımı, daha az enerji gereksinimi ve çevre dostu olması nedeniyle fiziksel ve kimyasal yöntemlerden üstündür (Ebrahiminezhad vd., 2018; Kharissova vd., 2013). Son zamanlarda, farklı metal nanoparçacıkların sentezlenmesi için biyolojik sentez yöntemi ile birçok yaklaşım geliştirilmiştir. Nanopartiküllerin sentezi için bitkiler, mantarlar, algler, mayalar ve bakteriler gibi farklı yeşil kaynaklar kullanılmaktadır (Monga vd., 2020; Demir, 2021).

Yeşil sentez işlemi, kimyasal sentezde sıklıkla kullanılan sodyum borohidrit veya hidrazin hidrat gibi kimyasal maddelerin kullanılmadığı, biyolojik ajanların kullanıldığı çevre dostu bir yöntemdir (Iravani, 2011). Bitkinin yaprak, meyve, ağaç kabuğu, tohum gibi çeşitli kısımlarından elde edilen ekstraktlardaki biyomoleküller, öncü olarak kullanılan metal (demir, gümüş, altın vb.) iyonlarını indirgeme özelliğine sahiptir. Bu biyomoleküllerin örnekleri flavonoidler, alkaloidler, terpenoidler, polifenoller ve şekerdir. Bu maddeler nanoparçacık sentezinde indirgeyici ve kararlaştırıcı olarak rol oynamaktadır (Saif vd., 2016). Bu sayede nanoparçacık sentezi daha kolay, daha hızlı ve daha ekonomik bir yöntem olmaktadır.

FeNP'lerin su ve topraktaki kirleticilerin giderilmesinde kullanımı, on yılı aşkın bir süredir dünyanın çeşitli ülkelerinde uygulanmaktadır (Fu vd., 2014). Literatürde beta-laktam antibiyotikler, boya, klorlu solventler, klorlu pestisitler, nitrozamin, organofosfat, nitroaromatik, metaller, metaloidler, aktinit gibi birçok kirletici giderimini kapsayan çalışma mevcuttur (Crane ve Scott 2012; Mehrazar vd., 2015; Pan vd., 2019; Sui vd., 2019).

Lacivert renkte bir boya olan metilen mavisi (MM), suda, etanolde ve kloroformda kolayca çözünüp kuvvetli su tutma özelliğine sahiptir (Hameed, 2009; Arabi ve Sohrabi, 2014; Ngulube vd., 2019).

Boyarmaddeler biyobozunur olmadıkları ve toksik bileşikler içermeye olasıları yüksek oldukları için alıcı sular için risk oluşturma potansiyeline de sahiptirler. Alıcı su kaynaklarında çok küçük konsantrasyonlarda bile boyar maddelerin bulunması estetik açıdan istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle tekstil endüstrisi atıksularından boyarmadde içeren renk giderme işlemleri ekolojik önem kazanmaktadır. Boyama işlemlerinde kumaşa renk vermek için kullanılan boyar maddelerin kompleks kimyasal yapıları ve sentetik kökenlerine bağlı olarak saflaştırılması da oldukça zordur (Moussavi ve Khosravi, 2011).

Bu çalışmada, çevreye zarar vermeyen, ucuz ve basit bir yöntemle sentezlenmiş olan FeNP nanopartiküllerin biyosentezinde lavanta bitkisi (*Lavandula angustifolia*) özütü kullanılmıştır. FeNP üretimine metal tuzu/bitki özütü oranı, reaksiyon süresi ve sıcaklık parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Biyosentez yöntemi ile sentezlenmiş olan FeNP metalik nanopartiküller silikajel destek materyali üzerine modifiye edilerek yeni SiNH₂@FeNP nanokompozit elde edilmiştir. Elde edilen nanokompozitin yapısının karakterizasyon işleminden sonra, yeşil biyosentez yöntemiyle üretilen bu nanokompozit malzeme kullanılarak MM'nin sulu çözeltiden giderimi incelenmiştir. Giderim çalışmalarında değiştirilen parametrelerin etkileşimlerini ortaya çıkarmak için Box-Behnken deney tasarımı uygulanmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Kumar vd., (2016), yaptıkları çalışmada Lavanta (*Lavandula angustifolia*) yaprak özütünü kullanarak altın nanopartiküllerin (AuNP'ler) yeşil sentezi ve bunların antioksidan aktivitesini sulu faz koşulları altında değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda avantajlarına bakıldığında, gelecekteki tıbbi ve endüstriyel uygulamalar için atıl atmosfer içermeyen AuNP'lerin yeşil sentezini önermişlerdir.

Ebrahiminezhad vd., (2017), yaptıkları çalışmada metilen mavisi giderimi için Akdeniz servisi ekstraktı kullanarak demir nanopartikülleri sentezlemişlerdir. Oluşturulan ultra küçük nanokümlerin boya gideriminde oldukça iyi bir performans sergilediği bildirilmiştir.

Dinesh vd., (2012), yaptıkları çalışmada indirgeyici ajan olarak Glycyrrhiza glabra kök özütünü kullanarak gümüş nanopartiküllerin biyosentezini gerçekleştirmişlerdir. Gümüş nanopartiküllerin karakterizasyonunda SEM, EDX, XRD ve FTIR kullanmışlardır.

Abak (2008), de yaptığı yüksek lisans tezinde sulu çözeltilerden metilen mavisinin fındikkabuğu yüzeyine adsorpsiyon ve adsorpsiyon kinetiğini çalışmıştır. Çalışma sonuçlarına göre adsorpsiyon dengesine erişmek için 24 saatlik sürenin yeterli olduğuna karar verilmiştir. MM'nin giderim derecesi, çözelti pH'sı, iyon şiddeti ve sıcaklıktaki artma ve tane boyutundaki azalma ile arttığı belirtilmiştir. Denge verileri, Langmuir ve Freundlich izotermi kullanılarak analiz edilmiş ve izoterm parametreleri hesaplanmıştır. Sonuçların Langmuir izotermine denge verileri ile oldukça iyi bir uyum içerisinde olduğunu belirtmiştir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Adsorban ve Kullanılan Kimyasal Maddeler (Adsorbent and Chemicals Used)

Çalışmada kullanılan lavanta bitkisi, Isparta İli'ndeki yerel satıcılardan temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm kimyasal reaktifler analitik saflıktadır ve Merck veya Sigma-Aldrich'ten temin edilmiştir. pH ayarlamaları 0,01 M'lık nitrik asit (HNO₃) ve sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri kullanılarak yapılmıştır.

3.2. Lavanta Bitkisi Özütünün Hazırlanması (Preparation of Lavender Plant Extract)

Lavanta bitkisi saf su ile yıkandıktan sonra oda sıcaklığında bir hafta kurutulmuştur. Ardından yüzey alanını arttırmak için öğütücü ile toz haline getirilmiştir. Lavanta bitkisinin özütünü hazırlamak için 5 gr lavanta tozu tartılıp 60 °C'de 100 ml saf su içerisine alınmıştır. Oluşan çözelti yaklaşık 20 dakika 60 °C sabit sıcaklıkta manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Oluşan koyu sarı renkli çözelti oda sıcaklığına gelene kadar soğumaya bırakılmış, soğumuş olan çözelti 4000 rpm'de 5 dk boyunca santrifüjlendikten sonra tekrar ardından filtre kâğıdı ile süzülüp, oluşan süzüntü deneyler için +4 °C'de buzdolabında bekletilmiştir.

3.3. FeNP'nin Sentez Şartlarının Belirlenmesi (Determination of Synthesis Conditions of FeNP)

Elde edilen lavanta bitkisi özütü, FeNP sentezi için kullanılmıştır. 10 mM'lık FeSO₄.7H₂O çözeltisi metalik nanopartiküllerin sentezinde metal tuzu olarak kullanılmıştır. Sentez deneylerinde toplam hacim 30 ml olacak şekilde farklı metal iyonu/özüt çözeltilerinin hacim oranları 25/5, 20/10, 15/15, 10/20, 5/25 olarak denemeler yapılmıştır. Sentez deneylerinde ortam pH'ı olarak doğal pH değeri alınıp, pH ayarlaması yapılmamıştır. Metalik nanopartikül sentezinde belirlenen sürelerde 400 rpm'de manyetik karıştırıcıda karıştırdıktan sonra UV-vis spektrofotometre ile zaman içinde çözelti renk değişimi ile birlikte oluşan FeNP için yüzey plazmon rezonans (SPR) pikleri olarak belirlenen maksimum absorban değerleri 410 nm'de ölçülerek izlenmiştir. Çalışmanın diğer aşamalarında 410 nm dalga boyundaki elde edilen absorban değerleri dikkate alınmıştır. Sentez çalışmalarında FeNP sentezine etki edecek olan Fe²⁺/özüt hacimsel oranı, reaksiyon süresi ve sıcaklık parametrelerinin etkisi incelenmiş ve optimum sentez koşulları sırası ile 10/20, 180 dk ve 55 °C olarak belirlenmiştir.

3.4. SiNH₂@FeNP Nanokompozit Sentezi (SiNH₂@FeNP Nanocomposite synthesis)

Silika jelin 3-aminopropil trimetoksisilan ile reaksiyonundan elde edilen malzeme katı destek olarak kullanılmıştır (Sadeghi ve Sheikhzadeh, 2009). SiNH₂@FeNP sentezi için SiNH₂ maddesinden 0,5 g alınarak üzerine 10 ml 10mM Fe²⁺ çözeltisi ilave edilmiş ve 15 dk süre ile 55 °C'de, 400 rpm'de manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Daha sonra bu çözelti üzerine 20 ml lavanta özütü damla damla ilave edilip karıştırma işlemine 3 saat süre ile devam edilmiştir. Oluşan son karışım 15 dakika santrifüj edilmiş ve elde edilen çökelek 2 defa saf su ilavesiyle santrifüj işlemi uygulanarak yıkama işlemi yapılmıştır. Bu işlem sonrasında elde edilen kahverengi çökelek etüvde 6 saat süre ile 80 °C'de kurutulmuştur.

3.5. SiNH₂@FeNP Nanokompozitlerinin Karakterizasyonu (Characterization of SiNH₂@FeNP Nanocomposites)

Elde edilen nanokompozitlerin kristal yapısını belirlemek için X-ışını toz difraktometri (XRD) ölçümü yapılmıştır. Yüzey ve morfolojik özellikleri belirlemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Malzemelerin yapısında bulunan fonksiyonel grupları belirlemek için FTIR spektrumları, bir Perkin Elmer Spectrum BX model spektrofotometre ile alınmıştır. Metalik nanoparçacıkların sentez aşamasında parametreleri optimize etmek için UV/Vis spektrofotometresi kullanılmıştır.

3.6. Deneysel Prosedür (Experimental procedure)

Metilen mavisinin SiNH₂@FeNP üzerine adsorpsiyonu deneyleri orbital bir çalkalayıcıda gerçekleştirilmiştir. Başlangıç MM konsantrasyonu, SiNH₂@FeNP miktarı ve MM adsorpsiyonunu etkileyen pH parametreleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda temas süresi, çalkalama hızı ve ortam sıcaklığı parametreleri sırasıyla 120 dakika, 200 rpm ve 25°C'de sabit tutulmuştur. Adsorpsiyon dengeye ulaştıktan sonra katı faz ve çözelti fazı santrifüj kullanılarak birbirinden ayrılmıştır. Tüm deneyler paralel olarak üç kez tekrarlanmış ve sonuçların ortalaması kullanılmıştır. SiNH₂@FeNP adsorpsiyon kapasitesi ve MM giderim yüzdesi aşağıdaki (1) ve (2) denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Q_e = \frac{(C_i - C_e)V}{W} \quad (1)$$

$$\text{Yüzde MM Giderim} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (2)$$

Denklemden, C_i, C_e ve C_f başlangıçtaki, dengedeki ve çözeltide kalan MM konsantrasyonlarını (mg/L), V çözeltinin hacmini (mL) ve W adsorban miktarını (g) belirtmektedir.

3.7. Analitik Yöntemler (Analytical Methods)

Çalışmada çözeltilerdeki MM konsantrasyonları 665 nm'de WTW PhotoLab 6100 UV-VIS Spektrofotometre kullanılarak ölçülmüştür. pH değerlerinin ölçümü için Milwaukee modeli kullanılmıştır. Nanokompozitlerin yüzey morfolojisini belirlemek için FEI Quanta FEG 250 model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. SiNH₂@FeNP nanokompozitinin yapısal özelliklerini incelemek için Bruker D8 Advance markalı X-Ray Difraktometre (XRD) kullanılmıştır. FTIR spektrumları, bir Perkin Elmer Spectrum BX model spektrofotometre üzerinde alınmıştır. Kesikli (batch) yöntemiyle gerçekleştirilen adsorpsiyon çalışmaları WiseShake SHO-1D model çalkalayıcı ile gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler 3 kez tekrarlanmış ve ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir.

3.8. Box-Behnken Deneysel Tasarımı Kullanılarak Kesikli Çalışmaların Yapılması (Making Discrete Studies Using Box-Behnken Experimental Design)

Üç faktörlü ve ikinci dereceden terimli sistemlerin değerlendirileceği durumlar için (Nigiz, 2018), Box Behnken Deneysel Tasarım yaklaşımı olan özel bir deneysel tasarım şeması kullanılmıştır. Bu kapsamda literatürdeki çalışmalara bakılarak farklı deney parametrelerinin (nanokompozit miktarı, sıcaklık, kirletici konsantrasyonu vb.) çalışma aralıkları belirlenmiş ve Box-Behnken deney tasarımı yardımıyla optimum deneysel parametreler belirlenmiştir. Çözeltide kalan MM miktarları UV-VIS yöntemi ile analiz edilmiştir.

3.9. Box-Behnken İstatistiksel Deney Tasarımı (Box-Behnken Statistical Experiment Design)

Hazırlama koşullarını ve MM giderme verimini optimize etmek için faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Tepki yüzeyi yöntemi (TYT) tasarımları, etkileşimi ve hatta ikinci dereceden etkileri tahmin etmemize izin vermektedir ve bu nedenle bize araştırılan yanıt yüzeyinin (yerel) şekli hakkında fikir vermektedir. Box-Behnken tasarımı, üç faktör (başlangıç konsantrasyonu (X₁), adsorban dozajı (X₂) ve pH (X₃) ve üç seviye (düşük, orta ve yüksek) içeren bir TYT problemi için maksimum verimliliğe sahiptir. Bu nedenle, gerekli çalışma sayısı, merkezi bir kompozit tasarıma kıyasla daha azdır.

Bu çalışmada, pH, metilen mavisi konsantrasyonu ve SiNH₂@FeNP dozajı gibi işletme parametrelerinin metilen mavisi giderim yüzdeleri ve SiNH₂@FeNP adsorpsiyon kapasiteleri üzerindeki etkilerini belirlemek için Box-Behnken istatistiksel deney tasarımı yöntemi kullanılmıştır. Bu deneylerde metilen mavisi konsantrasyonu (X₁=10-100 mg/L), SiNH₂@FeNP dozu (X₂=0,5-4 g/L) ve pH (X₃=4-10) bağımsız değişkenler, yüzde metilen mavisi giderimleri ve SiNH₂@FeNP adsorpsiyon kapasiteleri ise bağımlı değişkenler olarak kabul edilmiştir. Sırasıyla -1, 0 ve +1 olarak belirlenen her bir değişkenin düşük, orta ve yüksek düzeyleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Box-Behnken istatistiksel deney tasarımında bağımsız değişkenlerin düzeyleri (Levels of independent variables in Box-Behnken statistical experiment design)

Değişken	Sembol	Kodlanmış Değişken Seviyeleri		
		Düşük	Orta	Yüksek
		-1	0	+1
Metilen mavisi kons. (mg/L)	X ₁	10	55	100
SiNH ₂ @FeNP dozu (g/L)	X ₂	0.5	2.25	4
pH	X ₃	4	7	10

Tüm deneylerde sıcaklık, çalkalama süresi ve karıştırma hızı literatüre dayalı olarak sırasıyla 20 °C, 120 dakika ve 200 rpm olarak ayarlanmıştır (Arabi ve Sohrabi 2014; Erşan vd., 2020; Moussavi ve Khosravi 2011). Deneysel tasarım yönteminde toplam 17 farklı test grubu oluşturulmuş ve test sonuçlarının tekrarlanabilirliğini test etmek için merkez noktası beş kez tekrarlanmıştır. Tepki fonksiyonu katsayıları, deneysel veriler ve Stat-Ease Design Expert 7.0.3 Trail bilgisayar programı kullanılarak regresyon ile belirlenmiştir (Pamukoglu vd., 2017). Deneysel sonuçlar, aşağıda sunulan standart ikinci dereceden polinom denklemi ile doğrulanmıştır;

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^3 + b_{44}X_4^4 \quad (3)$$

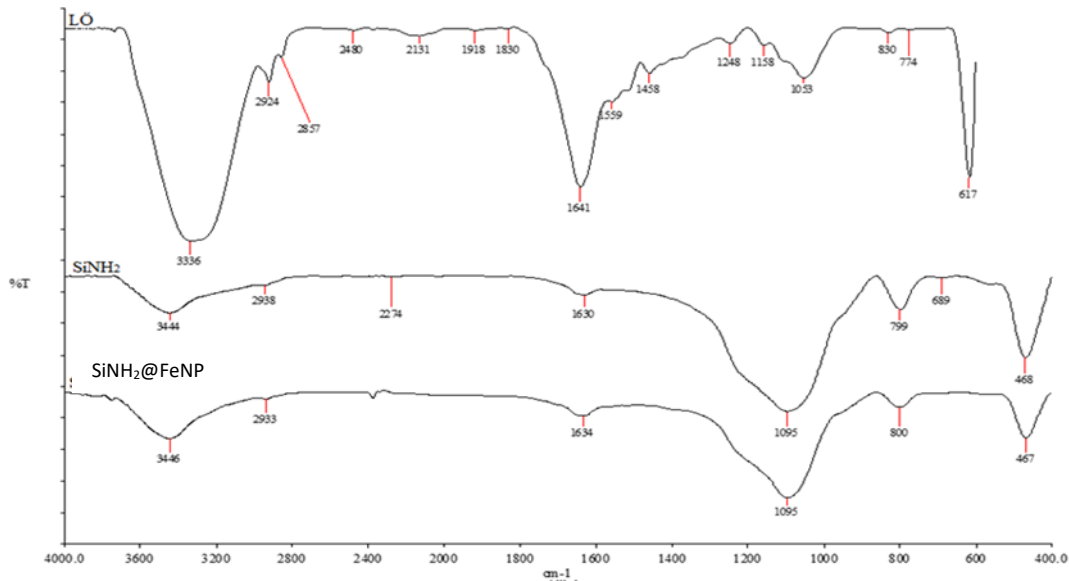
burada Y, tahmin edilen tepkidir (yüzde Metilen mavisi giderimleri ve SiNH₂@FeNP adsorpsiyon kapasiteleri), b₀ ofset terimidir ve b_i lineer etkidir, b_{ii} ve b_{ij} ise kare ve etkileşim etkileridir, X ise sırasıyla bağımsız değişkenlerdir.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

4.1. Sentezlenen Nanokompozitin FTIR Analizi (FTIR Analysis of Synthesized Nanocomposite)

Biyosentez yöntemi ile lavanta özütü kullanılarak sentezlenmiş olan SiNH₂@FeNP nanokompozitinin FTIR spektrumları SiNH₂ destek malzemesi ve lavanta özütü ile birlikte karşılaştırmalı olarak Şekil 1'de verilmiştir.

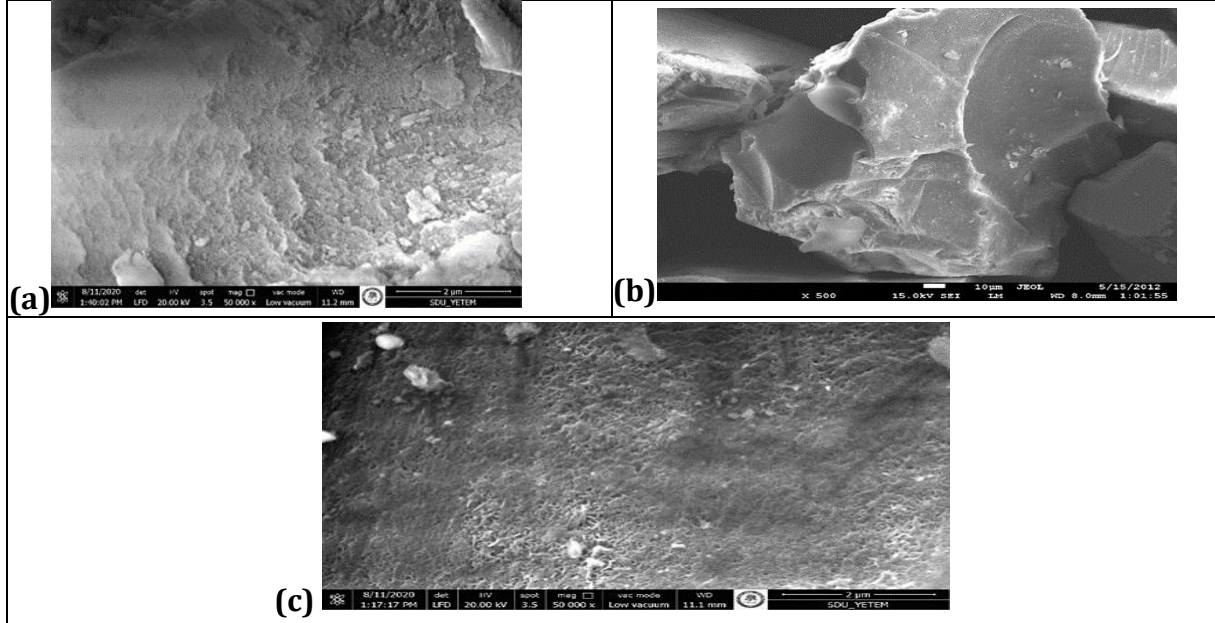
Kullanılan lavanta özütleri demir iyonlarının indirgenmesi yanında aynı zamanda oluşan demir nanopartiküllerin kararlılaştırılması için de etkin bir rol almaktadır. Lavanta su özütlerinin sıvı olarak alınmış olan FTIR spektrumlarına bakıldığında 3336 cm⁻¹'de su molekülleri nedeniyle geniş bir spektrum elde edilmiştir. Spektrumlarda 1641 cm⁻¹'de özütte mevcut C=O fonksiyon gruplarını temsil eden spektrumlar görülmektedir. Ayrıca lavanta özütünde karakteristik pikler 2924, 2857, 2131, 1458, 1248, 1158, 1053 ve 617 cm⁻¹ bölgelerinde elde edilmiştir. SiNH₂ destek maddesi ve FeNP modifiye edilmesi sonrasında elde edilmiş olan SiNH₂@FeNP nanokompozitinin FTIR spektrumları arasında Şekil 1'de görüldüğü gibi bariz farklılıklar gözlenmemesine rağmen bazı spektrumlarda görülen kaymalar modifiye işleminin gerçekleştiğini düşündürmektedir. Sentezlenmiş olan nanokompozitin SiNH₂ destek maddesinin üzerine modifiye olan FeNP nanopartiküllerinin fonksiyonel grup içermemesi nedeniyle spektrumlarda bariz farklılıklar gözlenmemektedir. Elde edilen SiNH₂@FeNP nanokompozitinin IR spektrumu SiNH₂ spektrumu ile karşılaştırıldığında, 3446 cm⁻¹ bölgesinde gözlenen ve O-H gerilme piklerine ait spektrum, 1634 cm⁻¹ bölgesindeki gerilme piklerinin alkolik ve fenolik O-H gruplarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun yanında SiNH₂@FeNP nanokompoziti için karakteristik pikler 1095, 800 ve 467 cm⁻¹ bölgelerinde elde edilmiştir. Ayrıca parmak izi bölgesinde SiNH₂ destek maddesi için elde edilen 468 cm⁻¹ pikinin SiNH₂@FeNP nanokompozitinde gözlenen kaymalarında FeNP modifikasyonunun gerçekleştiğini gösterdiği düşünülmektedir (Cao vd., 2020; Pan vd., 2020; Perrotti vd., 2019; Xiao vd., 2015).



Şekil 1. Lavanta özütü (LÖ), SiNH₂ ve SiNH₂@FeNP FTIR spektrumları (FTIR spectra of lavender extract (LÖ), SiNH₂ and SiNH₂@FeNP)

4.2. Sentezlenen Nanokompozitin SEM Analizi (SEM Analysis of Synthesized Nanocomposite)

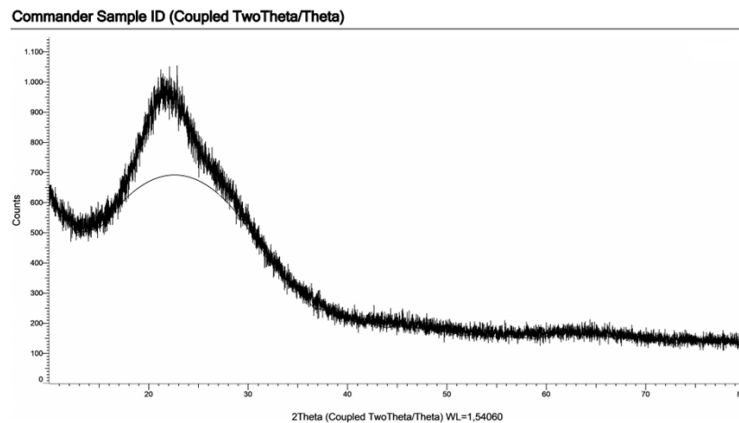
Biyosentez yöntemiyle elde edilen nanokompozitlerin yüzey morfolojisini belirlemek için FEI Quanta FEG 250 model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Biyosentez yöntemiyle elde edilen $\text{SiNH}_2@FeNP$ nanokompozitlerin SEM görüntüleri ile bu çalışmada destek materyali olarak kullanılan ham silika jelin görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir. Elde edilen SEM görüntülerinden sentezlenen nanokompozit, ham silika jel ve $\text{SiNH}_2@FeNP$ ile karşılaştırıldığında nanokompozitlerin yüzey morfoljisinde değişiklikler olduğu görülmektedir. SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlar, diğer analiz yöntemlerinden elde edilen bulguları destekler niteliktedir (Cao vd., 2020; Perrotti vd., 2019; Xiao vd., 2015).



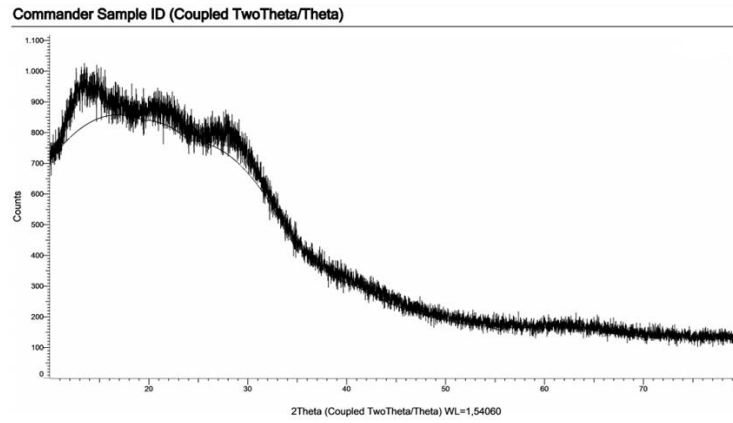
Şekil.2. SEM görüntüleri (a) SiNH_2 , (b) Ham Silika jel ve (c) $\text{SiNH}_2@FeNP$ nanokompoziti (SEM images of (a) SiNH_2 , (b) Crude Silica gel and (c) $\text{SiNH}_2@FeNP$ nanocomposite)

4.3. Sentezlenen Nanokompozitin XRD Analizi (XRD Analysis of Synthesized Nanocomposite)

Çalışmada biyosentez yöntemiyle elde edilen $\text{SiNH}_2@FeNP$ nanokompozitinin yapısal özelliklerini incelemek için Bruker D8 Advance markalı X-Ray Difraktometre (XRD) kullanılmıştır. XRD analizinden sonra elde edilen spektrumlardan sentezlenen malzemelerin kristal yapısı hakkında bilgi edinmek mümkündür. Bu çalışmada elde edilen nanokompozitlerin ve destek malzemesi SiNH_2 'nin XRD analizinden sonra elde edilen spektrumlar Şekil 3. ve Şekil 4'te verilmiştir. $\text{SiNH}_2@FeNP$ nanokompozitler için elde edilen XRD spektrumlarında bir kristal demir piki tespit edilememiştir. Bu durum SiNH_2 destek malzemesi yüzeyi üzerine kaplanan demir nanoparçacıkların amorf bir yapıya sahip olduğunu ve çok küçük yapı kristallerin XRD ile tespit edilemeyecek bir formda olduğunu göstermektedir (Lohrasbi vd., 2019; Pan vd., 2019; Wang vd., 2014; Xiao vd., 2015). Ayrıca SiNH_2 destek malzemesi için elde edilen XRD spektrumu ile nanokompozitler için elde edilen XRD spektrumu karşılaştırıldığında, gözlemlenen mevcut farklılıklardan dolayı modifikasyon işleminin gerçekleştiği düşünülmektedir.



Şekil 3. SiNH_2 'nin XRD Spekturumu (XRD Spectrum of SiNH_2)



Şekil 4. SiNH₂@FeNP'nin XRD Spekturumu (XRD Spectrum of SiNH₂@FeNP)

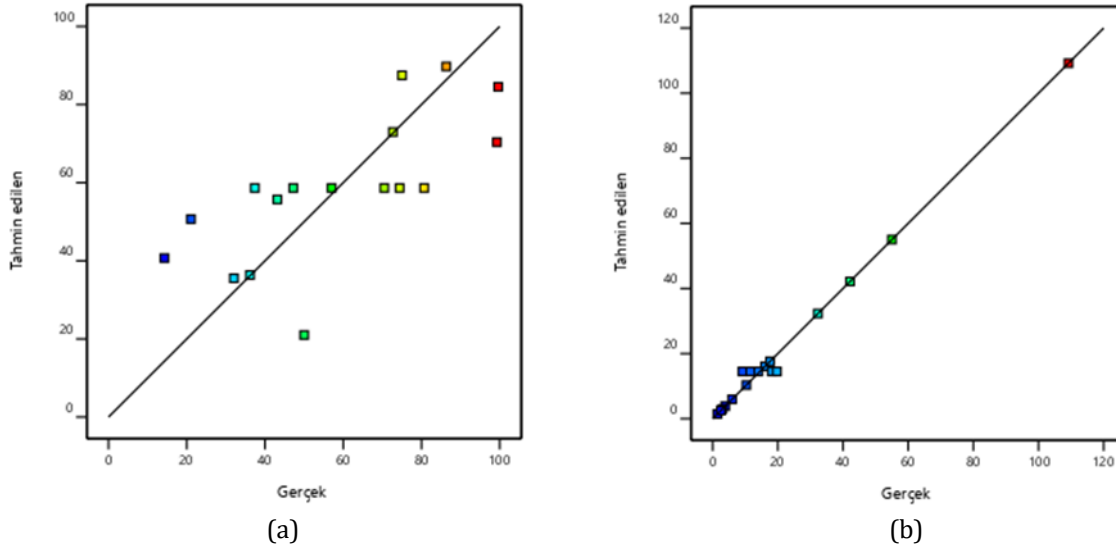
4.4. MM Giderimi Değerlendirilmesinde Deneysel Optimizasyon (Experimental Optimization in Evaluation of MM Removal)

SiNH₂@FeNP nanokompozit üzerine metilen mavisinin adsorpsiyonu hem deney sonuçlarının değerlendirilmesinde hem de literatürde yeni olan deney sayısının optimize edilmesinde Box-Behnken istatistiksel deneysel optimizasyonu kullanılarak incelenmiştir (Elmoubarki vd., 2017; Pamukoğlu ve Kargı, 2009). Deney tasarımına bağlı olarak gerçek ve kodlanmış bağımsız değişkenler ile birlikte yüzde çözümde tahmin edilen ve ölçülen metilen mavisi değerleri Tablo 2'de özetlenmiştir. Metilen mavisinin giderilmesinde 17 farklı deney seti gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Metilen mavisi giderim yüzdesinin değerlendirilmesinde Box-Behnken deneysel istatistiksel tasarımı için gerçek ve kodlanmış bağımsız değişkenler (Actual and coded independent variables for the Box-Behnken experimental statistical design for the evaluation of percent methylene blue removal)

Deney Tekrar Sayısı	Gerçek ve kodlanmış bağımsız değişkenler		
	(X ₁) MM kons. (mg/L)	(X ₂) SiNH ₂ @FeNP doz (g/L)	(X ₃) pH
1	100 (+1)	2,25 (0)	4 (-1)
2	55 (0)	0,5 (-1)	4 (-1)
3	55 (0)	4 (+1)	10 (+1)
4	55 (0)	2,25 (0)	7 (0)
5	10 (-1)	2,25 (0)	10 (+1)
6	10 (-1)	4 (+1)	7 (0)
7	10 (-1)	2,25 (0)	4 (-1)
8	100 (+1)	2,25 (0)	10 (+1)
9	55 (0)	2,25 (0)	7 (0)
10	10 (-1)	0,5 (-1)	7 (0)
11	55 (0)	2,25 (0)	7 (0)
12	55 (0)	4 (+1)	4 (-1)
13	100 (+1)	0,5 (-1)	7 (0)
14	55 (0)	2,25 (0)	7 (0)
15	100 (+1)	4 (+1)	7 (0)
16	55 (0)	0,5 (-1)	10 (+1)
17	55 (0)	2,25 (0)	7 (0)

Box-Behnken deneysel istatistiksel tasarımı ile MM giderim ve adsorban kapasitesi yüzdesinin değerlendirilmesinde gerçek ve tahmin edilen deneysel sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir. Deneysel veriler analiz edildiğinde, SiNH₂@FeNP'nin MM giderim ve adsorban kapasitesi yüzde olarak bulunmuştur. Yüzde giderim ve adsorban kapasitesi deney setlerinin belirleme katsayısı (R²) değerleri sırasıyla 0,228 ve 0,313 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. MM giderim yüzdesinin (a) ve adsorban kapasitesinin (b) değerlendirilmesinde Box-Behnken deneysel istatistiksel tasarımıyla gerçek ve tahmin edilen deneysel sonuçlar (Actual and predicted experimental results with Box-Behnken experimental statistical design in the evaluation of MM removal percentage (a) and adsorbent capacity (b))

Deneysel verilerden hesaplanan katsayılar kullanılarak yüzde Metilen Mavisi giderimi için aşağıdaki çözüm fonksiyonu elde edilmiştir;

$$\text{Yüzde Metilen Mavisi giderimi (Kodlanmış değişkenlere göre)} = +58,65 + 4,40 * X_1 - 3,398 * X_2 + 12,95 * X_3 - 22,70 * X_1 * X_2 - 20,29 * X_1 * X_3 - 8,97 * X_2 * X_3 \quad (4)$$

Öte yandan, Denklem 4 aşağıdaki denklem (5) ile temsil edilebilir;

$$\text{Yüzde Metilen Mavisi giderimi (Reel değişkenlere göre)} = +58,65 + 4,40 * \text{MM Kons.} - 3,398 * \text{Adsorbent dozu} + 12,95 * \text{pH} - 22,70 * \text{MM Kons.} * \text{Adsorbent dozu} - 20,29 * \text{MM Kons.} * \text{pH} - 8,97 * \text{Adsorbent dozu} * \text{pH} \quad (5)$$

4.5. Varyans Analizi (Analysis of Variance)

Modelin temsili ve Metilen Mavisi giderim yüzdesinin değerlendirilmesinde deneysel sonuçlar Tablo 3'te gösterilmiştir. Deneysel verilerin istatistiksel tasarım programı ile analizi sonucunda ikinci dereceden model en uygun model olarak belirlenmiştir (p-değeri < 0,0050).

Tablo 3. Metilen Mavisi giderim yüzdesinin değerlendirilmesinde model ve deneysel sonuçların temsili (Representation of model and experimental results in the evaluation of percent Methylene Blue removal)

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri	Belirleme
Ortalama&Toplam	58482,52	1	58482,52			
Doğrusal&Ortalama	1623,65	3	541,22	0,7564	0,5382	
2FI&Doğrusal	4030,00	3	1343,33	2,55	0,1147	Önerilen
Kuadratik&2FI	498,25	3	166,08	0,2436	0,8634	
Küçük& Kuadratik	3457,55	3	1152,52	3,50	0,1286	Benzeşen
Kalan	1315,66	4	328,92			
Toplam	69407,63	17	4082,80			

Yanıtlardaki eğriliğin önemini %95'lik bir güven düzeyinde belirlemek için varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. ANOVA sonuçları, denklemlerin her bir yanıt ile önemli değişkenler arasındaki gerçek ilişkiyi yeterince temsil ettiğini göstermiştir. F değeri, modellerin anlamlı olduğunu ve "Prob > F" değerinin 0,05'ten küçük değerleri, model terimlerinin anlamlı olduğunu göstermektedir. Özellikle ilişkili P değerine sahip daha büyük F değeri (0,05'ten küçük, güven aralıkları), deneysel sistemlerin daha az hata ile etkin bir şekilde modellenebileceği anlamına gelmektedir (Elmoubarki vd., 2017). Metilen Mavisi giderim yüzdesinin değerlendirilmesinde ikinci dereceden çözüm modeli için ANOVA ve uygunluk testi sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur. Analiz testi ile (1,79) olarak hesaplanan F değeri modelin önemini ortaya koymaktadır. P değeri 0,05'ten (%95) büyük olduğunda değişken parametrelerin birbiri ile ilişkisi anlamsız bulunmuştur. Öte yandan, model değerlendirmesinde tüm değişken parametreler (pH, MM ve adsorban konsantrasyonu) önemsiz bulunmuştur.

Tablo 4. Yüzde metilen mavisi giderimi değerlendirilmesinde $\text{SiNH}_2\text{@FeNP}$ kuadratik çözüm modeli için ANOVA ve uyum test sonuçları (ANOVA and fit test results for the $\text{SiNH}_2\text{@FeNP}$ quadratic solution model in the evaluation of percent methylene blue removal)

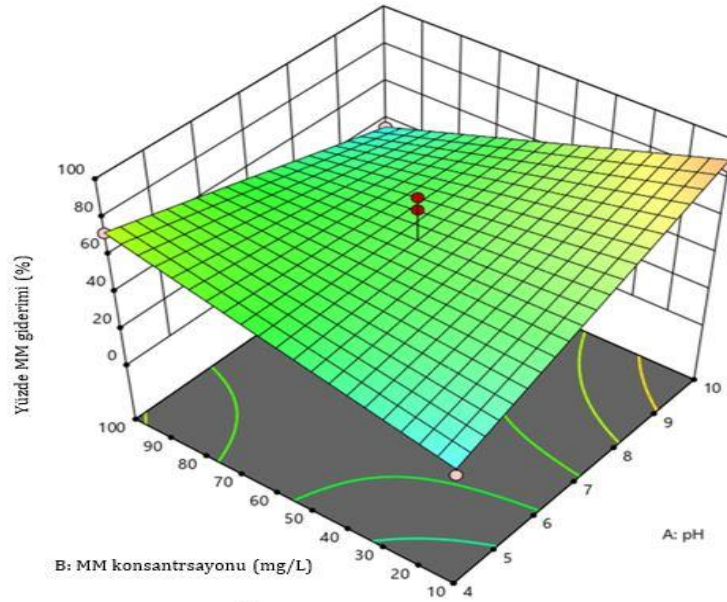
Kaynak	Kareler toplamı	d_f	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri	Belirleme
Model	5653,65	6	942,27	1,79	0,1989	Önemsiz
A-pH	154,76	1	154,76	0,2936	0,5998	
B-MM Kons.	127,03	1	127,03	0,2410	0,6341	
C-Adsorbent Doz.	1341,86	1	1341,86	2,55	0,1417	
AB	2061,71	1	2061,71	3,91	0,0762	
AC	1646,42	1	1646,42	3,12	0,1076	
BC	321,86	1	321,86	0,6106	0,4527	
Kalanlar	5271,47	10	527,15			
Uyum	3955,80	6	659,30	2,00	0,2610	Önemsiz
Hata	1315,66	4	328,92			
Toplam Düzeltme	10925,12	16				

4.6. Yanıt Yüzey Analizi (Response Surface Analysis)

Çalışılan üç faktöre (pH, başlangıç MM konsantrasyonu ve adsorban dozajı) göre adsorbe edilen MM miktarının yanıt yüzeyinin grafiksel gösterimi, değişkenler arasındaki etkileşimlerin daha iyi anlaşılmasını sağlamak ve her bir değişkenin optimum seviyesini belirlemek için kullanılmıştır. Bu nedenle, yanıt yüzeylerinin (3D) eğrilerini çizerek yanıtın evrimini açıklamak için matematiksel modelin grafikleri aşağıda verilmiştir.

4.6.1. MM Konsantrasyonu ve pH Arasındaki İlişki (Relationship Between MM Concentration and pH)

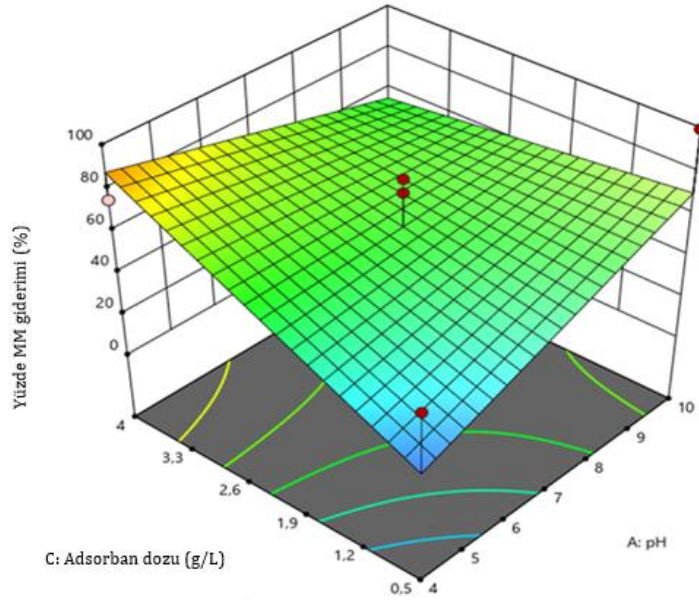
$\text{SiNH}_2\text{@FeNP}$ için farklı pH ve Metilen mavisi (MM) konsantrasyonlarında yüzde metilen mavisi giderimlerinin değişimleri Şekil 6.'da verilmiştir. Şekilde gösterilen tüm verilerin değerlendirilmesinde adsorban dozu=2,25 g/L, sabit tutulmuş ve diğer parametreler değiştirilmiştir. Şekil 6'da da görüldüğü üzere yüksek yüzde MM giderimlerine ulaşılabilmesi için pH değerini yüksek ve MM konsantrasyonlarını düşük tutmak gerekmektedir. %90' a yakın bir MM giderimine ulaşabilmek için pH değeri 10 ve MM konsantrasyonunu ise 10 mg/L'de tutmak gerektiği görülmektedir.



Şekil 6. $\text{SiNH}_2\text{@FeNP}$ için farklı metilen mavisi konsantrasyonu ve pH değişimlerinde yüzde MM giderimlerinin değişimleri, (Adsorbent dozu: 2,25 g/L sabit) (Changes of percent MM removals at different methylene blue concentrations and pH changes for $\text{SiNH}_2\text{@FeNP}$, (Adsorbent dose: 2.25 g/L fixed))

4.6.2. Adsorban Dozu ve pH Arasındaki İlişki (Relationship Between Adsorbent Dose and pH)

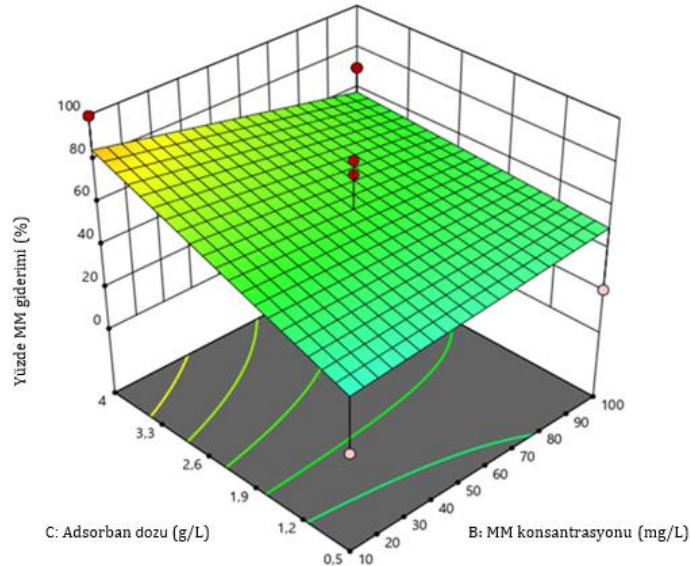
$\text{SiNH}_2\text{@FeNP}$ için farklı pH ve adsorban dozu konsantrasyonlarında yüzde metilen mavisi giderimlerinin değişimleri Şekil 7.'de verilmiştir. Şekilde gösterilen tüm verilerin değerlendirilmesinde metilen mavisi konsantrasyonu=55 mg/L, sabit tutulmuş ve diğer parametreler değiştirilmiştir. Şekil 7'de de görüldüğü üzere yüksek yüzde MM giderimlerine ulaşılabilmesi için pH değerini düşük ve adsorban dozunu yüksek tutmak gerekmektedir. %87' ye yakın bir MM giderimine ulaşabilmek için pH değeri 10 ve adsorban dozunu ise 4 g/L civarında tutmak gerekmektedir.



Şekil 7. SiNH₂@FeNP için farklı pH ve adsorban dozu konsantrasyonlarında yüzde MM giderimlerinin değişimleri, (Metilen mavisi konsantrasyonları=55 mg/L sabit) (For SiNH₂@FeNP, changes in percent MM removals at different pH and adsorbent dose concentrations, (Methylene blue concentrations=55 mg/L fixed))

4.6.3. MM konsantrasyonu ve Adsorban Dozu Arasındaki İlişki (Relationship Between MM Concentration and Adsorbent Dose)

SiNH₂@FeNP için farklı metilen mavisi konsantrasyonu ve adsorban dozu konsantrasyonlarında yüzde metilen mavisi giderimlerinin değişimleri Şekil 8.'de verilmiştir. Şekilde gösterilen tüm verilerin değerlendirilmesinde pH =7, sabit tutulmuş ve diğer parametreler değiştirilmiştir. Şekil 8'de de görüldüğü üzere yüksek yüzde MM giderimlerine ulaşılabilmesi için metilen mavisi konsantrasyonunu düşük ve adsorban dozunu yüksek tutmak gerekmektedir. %85' e yakın bir MM giderimine ulaşabilmek için metilen mavisi konsantrasyonu 10 mg/L ve adsorban dozunu ise 4 g/L'de tutmak gerekmektedir.



Şekil 8. SiNH₂@FeNP için farklı metilen mavisi konsantrasyonu ve adsorban dozu konsantrasyonlarında yüzde MM giderimlerinin değişimleri, (pH=7 sabit) (Changes of percent MM removals at different methylene blue concentration and adsorbent dose concentrations for SiNH₂@FeNP, (pH=7 constant))

4.7. Adsorpsiyon Kapasitesinin Değerlendirilmesinde Deneysel Optimizasyon (Experimental Optimization in Evaluation of Adsorption Capacity)

Deneysel verilerden hesaplanan katsayılar kullanılarak MM adsorpsiyon miktarı için aşağıdaki çözüm fonksiyonu elde edilmiştir;

$$\begin{aligned} \text{MM adsorpsiyon kapasitesi (Kodlanmış değişkenlere göre)} = & +14,51+12,46*X_3+13,61*X_2-6,23*X_1-4,66*X_3*X_1- \\ & 14,65*X_3*X_2-6,04*X_1*X_2+13,87X_3^2-14,97X_2^2+16,74*X_1^2+0,0000*X_3*X_2*X_1-2,83*X_3^2-30,77*X_3^2*X_1 \\ & 15,91*X_3*X_2^2+0,0000*X_3X_1^2+0,0000X_2^2X_1^*+0,0000*X_2X_1^2*+0,0000*X_3^3*+0,0000*X_2^3+0,0000X_1^3 \end{aligned} \quad (6)$$

Öte yandan, denklem 6 aşağıdaki denklem (7) ile temsil edilebilir;

$$\begin{aligned} \text{MM adsorpsiyon kapasitesi (Gerçek değişkenlere göre)} = & +14,51+12,46*pH+13,61*Adsorbent \text{ dozajı}-6,23*MM \\ & \text{konsantrasyonu}-4,66* pH * MM \text{ konsantrasyonu} -14,65* pH * Adsorbent \text{ dozajı} -6,04* MM \text{ konsantrasyonu} * \\ & \text{Adsorbent dozajı} +13,87 pH^2-14,97 Adsorbent \text{ dozajı}^2+16,74* MM \text{ konsantrasyonu}^2+0,0000* pH * Adsorbent \\ & \text{dozajı} * MM \text{ konsantrasyonu} -2,83* pH^2-30,77* pH^2* MM \text{ konsantrasyonu} 15,91* pH * Adsorbent \text{ dozajı} \\ & ^2+0,0000* pH MM \text{ konsantrasyonu}^2+0,0000 Adsorbent \text{ dozajı}^2 MM \text{ konsantrasyonu}^*+0,0000* Adsorbent \\ & \text{dozajı}*MM \text{ konsantrasyonu}^2+0,0000* pH^3+0,0000* Adsorbent \text{ dozajı}^3+0,0000 MM \text{ konsantrasyonu}^3 \end{aligned} \quad (7)$$

Adsorpsiyon kapasitesinin değerlendirilmesinde model ve deneysel sonuçların temsili Tablo 5'te gösterilmiştir. Deneysel verilerin istatistiksel tasarım programı ile analizi sonucunda Doğrusal ve Ortalama modelin en uygun model olduğu belirlenmiştir. Doğrusal ve ortalama model önerilen olup, MM yüzde giderim ile karşılaştırma yapabilmek için önerilen model yerine benzeşen kübik ve kuadratik seçilerek analizler yapılmıştır.

Tablo 5. Adsorpsiyon miktarlarının değerlendirilmesinde SiNH₂@FeNP için model denkliklerindeki uyum analizi (Analysis of fit in model equivalences for SiNH₂@FeNP in the evaluation of adsorption amounts)

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri	Belirleme
Ortalama&Toplam	8133,15	1	8133,15			
Doğrusal&Ortalama	5088,69	3	1696,23	3,43	0,0493	Önerilen
2FI&Doğrusal	1090,97	3	363,66	0,6811	0,5834	
Kuadratik&2FI	2844,67	3	948,22	2,66	0,1292	
Kübik& Kuadratik	2415,62	3	805,21	40,97	0,0018	Benzeşen
Kalan	78,62	4	19,65			
Toplam	19651,71	17	1155,98			

İkinci dereceden çözüm modeli için ANOVA test sonuçları Tablo 6'da sunulmuştur. Modellerin uygunluğunu belirlemek için varyans analizi testi (ANOVA) yapılmıştır. 48,51'lik Model F değeri, modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir F değerinin ortaya çıkma olasılığı yalnızca %0.01 idi. 0,05'ten küçük P değerleri, model terimlerinin anlamlı olduğunu gösterir. Bu durumda A, B, C, AC, A², B² ve C² önemli model terimleridir.

Tablo 6. Adsorpsiyon miktarlarının değerlendirilmesinde SiNH₂@FeNP kuadratik çözüm modeli için ANOVA ve uyum test sonuçları (ANOVA and fit test results for SiNH₂@FeNP quadratic solution model in the evaluation of adsorption amounts)

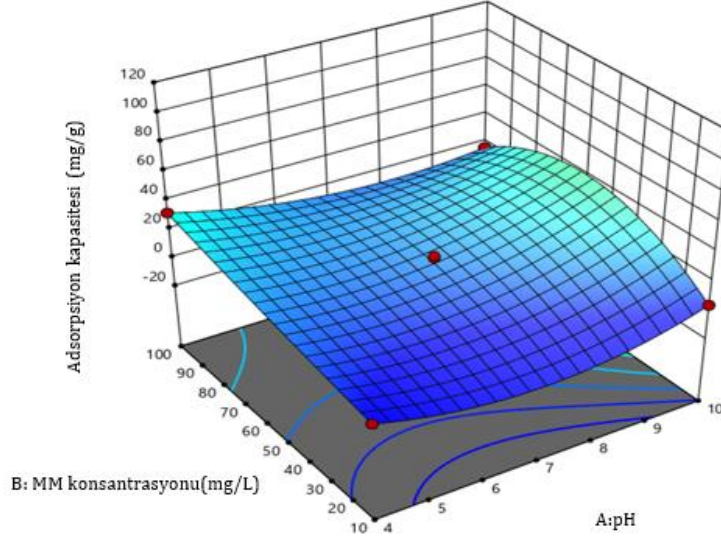
Kaynak	Kareler toplamı	df	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri	Belirleme
Model	11439,95	12	953,33	48,51	0,0010	Önemli
A-pH	620,53	1	620,53	31,57	0,0049	
B-MM Kons.	740,75	1	740,75	37,69	0,0036	
C-Adsorbent Doz.	155,16	1	155,16	7,89	0,0483	
AB	86,87	1	86,87	4,42	0,1034	
AC	858,10	1	858,10	43,66	0,0027	
BC	145,99	1	145,99	7,43	0,0527	
A ²	810,11	1	810,11	41,22	0,0030	
B ²	943,25	1	943,25	47,99	0,0023	
C ²	1180,39	1	1180,39	60,06	0,0015	
ABC	0,0000	0				
A ² B	15,98	1	15,98	0,8129	0,4182	
A ² C	1893,46	1	1893,46	96,34	0,0006	
AB ²	506,18	1	506,18	25,76	0,0071	
AC ²	0,0000	0				
B ² C	0,0000	0				
BC ²	0,0000	0				
A ³	0,0000	0				
B ³	0,0000	0				
C ³	0,0000	0				
Hata	78,62	4	19,65			
Toplam düzeltme	11518,57	16				

4.7.1. MM Konsantrasyonu ve pH arasındaki İlişki (Relationship between MM Concentration and pH)

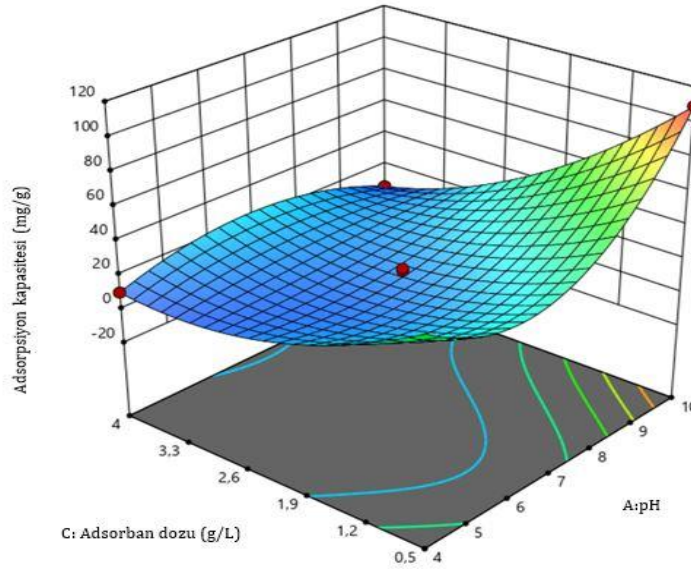
SiNH₂@FeNP için farklı pH ve Metilen mavisi (MM) konsantrasyonlarında adsorpsiyon kapasitesinin değişimleri Şekil 9'da verilmiştir. Şekilde gösterilen tüm verilerin değerlendirilmesinde adsorbent dozajı=2,25 mg/g sabit tutulmuş ve diğer parametreler değiştirilmiştir. Şekil 9'da da görüldüğü üzere yüksek adsorbent kapasitesine ulaşabilmesi için pH değerini ve metilen mavisi konsantrasyonunu yüksek tutmak gerekmektedir. 30 mg/g'a yakın MM adsorpsiyonuna ulaşabilmek için pH değeri 10 ve metilen mavisi değerini 100 mg/L'de tutmak gerekmektedir.

4.7.2. Adsorbent Dozu ve pH Arasındaki İlişki (Relationship Between Adsorbent Dose and pH)

SiNH₂@FeNP için farklı pH ve adsorbant dozajı değerlerinde adsorpsiyon kapasitesinin değişimleri Şekil 10.'da verilmiştir. Şekilde gösterilen tüm verilerin değerlendirilmesinde MM=55 mg/L de sabit tutulmuş ve diğer parametreler değiştirilmiştir. Şekil 10'da da görüldüğü üzere MM'nin yüksek adsorpsiyonu için pH değerini yüksek ve adsorbant dozajını düşük tutmak gerekmektedir. 110 mg/g'a yakın bir değere ulaşabilmek için pH değeri 10 ve adsorbant dozajını 0,5mg/g'da tutmak gerekmektedir.



Şekil 9. SiNH₂@FeNP için farklı pH ve metilen mavisi konsantrasyonlarında adsorbant kapasitesi değişimleri, (adsorbant dozajı=2,25 mg/g sabit) (Adsorbent capacity changes for SiNH₂@FeNP at different pH and methylene blue concentrations, (adsorbent dosage=2.25 mg/g fixed))

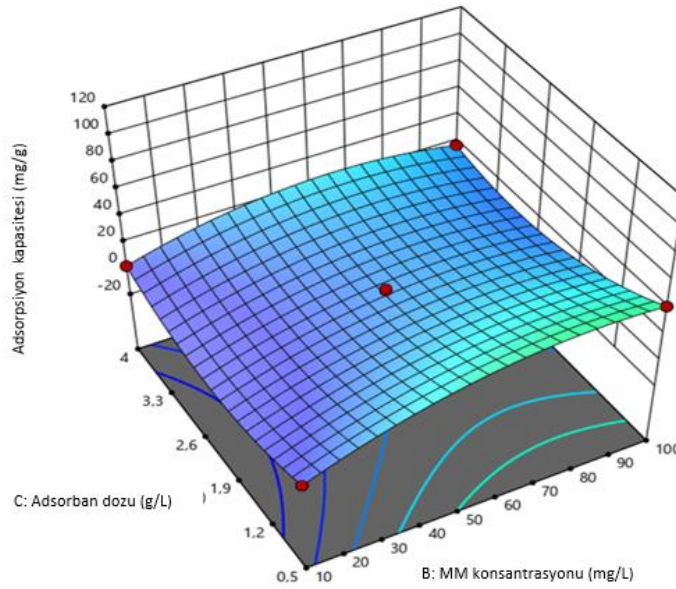


Şekil 10. SiNH₂@FeNP için Farklı pH ve adsorbant dozu konsantrasyonlarında adsorbant kapasitesi değişimleri, (Metilen mavisi konsantrasyonları=55 mg/Lsabit) (Adsorbent capacity changes at different pH and adsorbent dose concentrations for SiNH₂@FeNP (Methylene blue concentrations=55 mg/L fixed))

4.7.3. Adsorbent Dozu ve MM Konsantrasyonu Arasındaki İlişki (Relationship Between Adsorbent Dose and MM Concentration)

SiNH₂@FeNP için farklı adsorbant dozajı ve metilen mavisi (MM) konsantrasyonlarında adsorpsiyon kapasitesinin değişimleri Şekil 11.'de verilmiştir. Şekilde gösterilen tüm verilerin değerlendirilmesinde pH=7'de sabit tutulmuş ve diğer parametreler değiştirilmiştir. Şekil 11'de de görüldüğü üzere yüksek adsorpsiyon kapasitesine ulaşabilmesi için adsorbant dozajı kapasitesini değerini düşük, metilen mavisi değerini yüksek tutmak

gerekmektedir. 41 mg/g' a yakın bir MM adsorpsiyonuna ulaşabilmek için adsorban dozajı miktarını 0,5 mg/g ve metilen mavisi değerini 100mg /L 'de tutmak gerekmektedir.



Şekil 11. SiNH₂@FeNP için farklı adsorban dozajı ve metilen mavisi konsantrasyonlarında adsorbant kapasitesi değişimleri, (pH=7 sabit) (Adsorbent capacity changes for SiNH₂@FeNP at different adsorbent dosages and methylene blue concentrations, (pH=7 constant))

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, adsorban olarak SiNH₂@FeNP kullanılarak metilen mavisinin sulu çözeltilerden adsorpsiyonu için Box-Behnken istatistiksel deney tasarımı kullanılmıştır. Bununla birlikte, başlangıç boya konsantrasyonu, pH ve adsorban dozunun adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmadan çıkarılabilecek başlıca sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- SiNH₂@FeNP'nin yapısı FTIR, XRD ve SEM teknikleri kullanılarak karakterize edilmiştir,
- Yaklaşık %75 'lik bir giderim elde etmek için adsorban dozu ve pH sırasıyla 0,5 g/L ve 9 gibi yüksek tutulmalıdır,
- Metilen Mavisi konsantrasyonu orta seviyelerde tutulmalıdır (yaklaşık 42 mg/L).
- Dolayısıyla bu çalışmada elde edilen bu sonuçlar lavanta bitkisi özütü kullanılarak elde edilen adsorbanın tekstil boyalarının uzaklaştırılmasında tercih edilebilir bir adsorbent olduğunu göstermiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2021-8299 proje numarası ile 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)

- Arabi, S., Sohrabi, M. 2014. Removal of Methylene Blue, a Basic Dye, from Aqueous Solutions Using Nano-Zerovalent Iron. *Water Science and Technology* 70(1),24–31. doi: 10.2166/wst.2014.189.
- Cao, Y., Zhou, G., Zhou, R., Wang, C., Chi, B., Wang, Y., Hua, C., Qiu, J., Jin, Y., Wu, S., 2020. Green Synthesis of Reusable Multifunctional γ -Fe₂O₃/Bentonite Modified by Doped TiO₂ Hollow Spherical Nanocomposite for Removal of BPA. *Science of the Total Environment* 708,134669. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134669.
- Crane, R. A., T. B. Scott. 2012. Nanoscale Zero-Valent Iron: Future Prospects for an Emerging Water Treatment Technology. *Journal of Hazardous Materials* 211–212:112–25. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.11.073.
- Demir, M. 2021. Green Synthesis of Spherical-Shape Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}CO₃ Particles. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* , 9(1), 330 – 335. doi: 10.21923/jesd.726228.
- Ebrahiminezhad, A., Taghizadeh, S., Ghasemi, Y., Berenjian, A., 2018. Green Synthesized Nanoclusters of Ultra-Small Zero Valent Iron Nanoparticles as a Novel Dye Removing Material. *Science of the Total Environment* 621,1527–32. doi:

- 10.1016/j.scitotenv.2017.10.076.
- Elmoubarki, R., Taoufik, M., Moufti, A., Tounsadi, H., Mahjoubi, F.Z., Bouabi, Y., Qourzal, S., Abdennouri, M., Barka, N., 2017. Box-Behnken Experimental Design for the Optimization of Methylene Blue Adsorption onto Aleppo Pine Cones. *Journal of Materials and Environmental Science* 8(6), 2184–91.
- Eren, A., Baran, M.F., 2019. Green Synthesis, Characterization and Antimicrobial Activity of Silver Nanoparticles (AgNPs) from Maize (*Zea Mays* L.). *Applied Ecology and Environmental Research* 17(2),4097–4105. doi: 10.15666/aeer/1702_40974105.
- Erşan, M., Güler, Ü. A., Doğan, H., Sarraj, B., 2020. Kolemanit Destekli NZVI Kullanılarak Sulu Çözeltilerden Metilen Mavisinin Giderimi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 9(1),114–27. doi: 10.28948/ngumuh.681256.
- Fenglian, F., Dionysios D. D., Liu, H., 2014. The Use of Zero-Valent Iron for Groundwater Remediation and Wastewater Treatment: A Review. *Journal of Hazardous Materials* 267,194–205. doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.12.062.
- Hameed, B. H., 2009. Evaluation of Papaya Seeds as a Novel Non-Conventional Low-Cost Adsorbent for Removal of Methylene Blue. *Journal of Hazardous Materials* 162(2–3),939–44. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.05.120.
- Iravani, S., 2011. Green Synthesis of Metal Nanoparticles Using Plants. *Green Chemistry* 13(10),2638. doi: 10.1039/c1gc15386b.
- Kharissova, O.V., Rasika Dias, H. V., Kharisov, B. I., Pérez, B.O., Pérez, V.M. J., 2013. The Greener Synthesis of Nanoparticles. *Trends in Biotechnology* 31(4),240–48. doi: 10.1016/j.tibtech.2013.01.003.
- Kumar, B., Smita, K., Vizueté, K.S., Cumbal, L., 2016. Aqueous Phase Lavender Leaf Mediated Green Synthesis of Gold Nanoparticles and Evaluation of Its Antioxidant Activity. *Biology and Medicine* 8(3). doi: 10.4172/0974-8369.1000290.
- Lohrasbi, S., Kouhbanani, M. A. J., Beheshtkoo, N., Ghasemi, Y., Amani, A. M., Taghizadeh, S., 2019. Green Synthesis of Iron Nanoparticles Using Plantago Major Leaf Extract and Their Application as a Catalyst for the Decolorization of Azo Dye. *BioNanoScience* 9(2),317–22. doi: 10.1007/s12668-019-0596-x.
- Mehrazar, E., Rahaie, M., Rahaie, S., 2015. Application of Nanoparticles for Pesticides, Herbicides, Fertilisers and Animals Feed Management. *International Journal of Nanoparticles* 8(1),1–19. doi: 10.1504/IJNP.2015.070339.
- Yukti, M., Kumar, P., Sharma, R. K., Filip, J., Varma, R. S., Zboşil, R., Gawande, B.M., 2020. Sustainable Synthesis of Nanoscale Zerovalent Iron Particles for Environmental Remediation. *ChemSusChem* 13(13),3288–3305. doi: 10.1002/cssc.202000290.
- Gholamreza, M., Khosravi, R., 2011. The Removal of Cationic Dyes from Aqueous Solutions by Adsorption onto Pistachio Hull Waste. *Chemical Engineering Research and Design* 89(10),2182–89. doi: 10.1016/j.cherd.2010.11.024.
- Nasrollahzadeh, M., Atarod, M., Sajjadi, M., Sajadi, S. M., Issaabadi, Z., 2019. Plant-Mediated Green Synthesis of Nanostructures: Mechanisms, Characterization, and Applications. *Interface Science and Technology*. 28, 199-322.
- Nigiz, F. 2018. Yüzey Yanıt Metodu ile Optimize Edilen Metil Laurat Üretiminin Membran Reaktörde Uygulanması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 6(1), 47-55. doi: 10.21923/jesd.375201.
- Ngulube, T., Gumbo, J. R., Masindi, V., Maity, A., 2019. Preparation and Characterisation of High Performing Magnesite-Halloysite Nanocomposite and Its Application in the Removal of Methylene Blue Dye. *Journal of Molecular Structure* 1184,389–99. doi: 10.1016/j.molstruc.2019.02.043.
- Pamukoglu, M. Y., Kargi, F., 2009. Removal of Cu(II) Ions by Biosorption onto Powdered Waste Sludge (PWS) Prior to Biological Treatment in an Activated Sludge Unit: A Statistical Design Approach. *Bioresource Technology* 100(8),2348–54. doi: 10.1016/j.biortech.2008.11.032.
- Pamukoglu, M. Y., Kirkan, B., Senyurt, M., 2017. Removal of Thorium(IV) from Aqueous Solution by Biosorption onto Modified Powdered Waste Sludge: Experimental Design Approach. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 314(1),343–52. doi: 10.1007/s10967-017-5349-0.
- Zibin, P., Lin, Y., Sarkar, B., Owens, G., Chen, Z., 2019. Green Synthesis of Iron Nanoparticles Using Red Peanut Skin Extract: Synthesis Mechanism, Characterization and Effect of Conditions on Chromium Removal. *Journal of Colloid and Interface Science* 558,106–14. doi: 10.1016/j.jcis.2019.09.106.
- Perrotti, T. C., Freitas, N. S., Alzamora, M., Sánchez, D. R., Carvalho, M.F., 2019. Green Iron Nanoparticles Supported on Amino-Functionalized Silica for Removal of the Dye Methyl Orange. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7(4),103237. doi: 10.1016/j.jece.2019.103237.
- Sadeghi, S., Sheikhzadeh, E., 2009. Solid Phase Extraction Using Silica Gel Modified with Murexide for Preconcentration of Uranium (VI) Ions from Water Samples. *Journal of Hazardous Materials* 163(2–3),861–68. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.07.053.
- Sadia, S., Tahir, A., Chen, Y., 2016. Green Synthesis of Iron Nanoparticles and Their Environmental Applications and Implications. *Nanomaterials* 6(11),1–26. doi: 10.3390/nano6110209.
- Chieh, S., Zhu, X., Djilali, N., 2019. Modeling of PEM Fuel Cell Catalyst Layers: Status and Outlook. Vol. 2. Springer Singapore.
- Kumar, S. V., Rajeshkumar, S., 2018. Plant-Based Synthesis of Nanoparticles and Their Impact. Vol. 1. Elsevier Inc.
- Ting, W., Jin, X., Chen, Z., Megharaj, M., Naidu, R., 2014. Green Synthesis of Fe Nanoparticles Using Eucalyptus Leaf Extracts for Treatment of Eutrophic Wastewater. *Science of the Total Environment* 466–467,210–13. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.022.
- Jianan, X., Gao, B., Yue, Q., Gao, Y., Li, Q., 2015. Removal of Trihalomethanes from Reclaimed-Water by Original and Modified Nanoscale Zero-Valent Iron: Characterization, Kinetics and Mechanism. *Chemical Engineering Journal* 262,1226–36. doi: 10.1016/j.cej.2014.10.080.



TÜRKÇE METİNDEN KONUŞMA SENTEZLEMeye YÖNELİK YAPILAN ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ

Gamze YILMAZ^{1*}, Mustafa YAĞCI²

¹ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Rektörlük, Kırşehir, Türkiye

² Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Metinden Konuşma Sentezleme,
Doğal Dil İşleme,
Literatür Analizi.*

Öz

Metinden konuşma sentezleme çalışmaları dijital ortamdaki her türlü bilginin sesli olarak iletilmesini sağlamaktadır. Doğal dil işleme çalışmaları ise doğal dilin yapısını daha iyi anlamak ve bilgisayar-insan etkileşimini kolaylaştırmak amacıyla yapılmaktadır. Bu çalışmada, metinden konuşma sentezleme ve doğal dil işleme teknolojilerinin entegrasyonu incelenmiştir. Yapılan literatür taramasına göre belirli kriterlerle araştırmaya dâhil edilen 24 çalışma incelenmiştir. Bu çalışmaların yaklaşık %62'si tez çalışmasıdır ve hiçbirinde doğrudan doğal dil işleme teknikleri kullanılmamıştır. Çalışmaların 10'unda ise, sadece metin işleme sürecinde doğal dil işleme teknikleri kullanılmış veya diğer yapay zekâ teknolojilerinden yararlanılmıştır. Araştırmacıların %50'si, vurgu ve tonlamalarda eksiklikler olduğunu, bu durumun iyileştirilmesinin; doğal dil işleme ile mümkün olduğunu savunmaktadır. Gelecekte yapılacak olan metinden konuşma sentezleme çalışmalarının daha verimli ve doğal bir konuşma elde etmek için doğal dil işleme teknikleriyle birlikte yürütülmesi, Türkçe için geliştirilen derleme metinlerinin sözcük dağarcığının artırılması ve anlamlarına göre sınıflandırılarak metinden konuşma sentezleme sistemlerine entegre edilmesi önerilmektedir. Bu öneriler doğrultusunda insan konuşmasına en yakın seslendirme elde edilmiş olacaktır.

ANALYSIS OF THE STUDIES BASED ON SPEECH SYNTHESIS FROM TURKISH TEXT

Keywords

*Synthesizing Text-To-Speech,
Natural Language Processing,
Literature Analysis.*

Abstract

Text-to-speech synthesis studies enables all kinds of information to be transmitted by voice. Natural language processing studies, performed in order to better understand the structure of natural language and to facilitate computer-human interaction. In this study, the integration of text-to-speech synthesis and natural language processing technologies is examined. According to the literature review, 24 studies included in the research with certain criteria were examined. Approximately 62% of these studies are dissertations and natural language processing techniques were not used directly in any of them. In 10 of the studies, natural language processing techniques were used or other artificial intelligence technologies were used only in the text processing process. 50% of the researchers stated that there are deficiencies in emphasis and intonation, that the improvement of this situation; argues that it is possible with natural language processing. It is suggested that future text-to-speech synthesis studies should be carried out together with natural language processing techniques, that the compilation texts developed for Turkish should be increased in vocabulary and that they should be classified according to their meanings and integrated into speech-to-text synthesis systems.

Alıntı / Cite

Yılmaz, G., Yağcı, M., (2022). Türkçe Metinden Konuşma Sentezlemeye Yönelik Yapılan Çalışmaların İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 286-296.

* İlgili yazar / Corresponding author: gamzeyilmaz08@gmail.com, +90-386-280-3330

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
G. Yılmaz, 0000-0002-1917-3740	Başvuru Tarihi / Submission Date	20.05.2021
M. Yağcı, 0000-0003-2911-3909	Revizyon Tarihi / Revision Date	30.09.2021
	Kabul Tarihi / Accepted Date	01.11.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde bilişim ve iletişim teknolojilerinin artmasıyla birlikte bilgiye erişim ve bilginin üretimi konularında büyük kolaylıklar sağlanmaktadır. Toplumdaki bireylerin bu bilgilere erişim sağlayabilmesi ülkenin gelişiminin devam etmesi açısından da son derece önemlidir. Bilgiye erişim, etkili ve doğru iletişimle mümkündür. Toplumdaki her bireyin yazılı ve dijital olan her ortamdaki bilgiye erişiminin sağlanabilmesi bilgi çağının gereklerindedir.

İnsan haberleşmesindeki en etkili yollardan birisi konuşmadır. Makine-insan etkileşimi de teknolojinin ilerlemesiyle çok büyük önem kazanmıştır. Metin seslendirme teknolojileri kullanıcıların bilgi kaynaklarını sürekli izlemesi gerekliliğini ortadan kaldırır ve makine-insan etkileşimini sağlayan yöntemlerden bir tanesidir (Şentürk ve Adalı, 2016). Metinden konuşma sentezleme sistemleri, dijital ortamdaki metinlerin sesli olarak kullanıcıya iletilmesini sağlamaktadır. Bu sistemlerin çok yaygın kullanım alanları bulunmaktadır ve gün geçtikçe kullanım alanları artmaktadır (Aşlıyan ve Günel, 2008). Metinden konuşma sentezleme sistemleri özellikle görme engelliler başta olmak üzere toplumdaki belirli bireylerin hayatını kolaylaştırmak amacıyla taşınabilir ve sabit birçok cihazda kullanılmaktadır (Yılmaz, 2009). Günümüzde bulut tabanlı uygulama programlama ara yüzü olarak hizmet veren metinden konuşma sentezleme sistemleri bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak Google Cloud Text-to-Speech, IBM Watson Text to Speech, Microsoft Azure Text to Speech (MATtS) ve Amazon Polly verilebilir (Karagöz ve Koruyan, 2020).

Doğal dil işleme çalışmaları, doğal dilin yapısını anlayarak insan-bilgisayar etkileşimini kolaylaştırmaya yarayan bir bilim dalıdır. Büyük veri, son birkaç yılda hızla büyümüştür. Bu nedenle ham verilerden anlamsal veri çıkarımı önemli bir gereklilik haline gelmiştir. Doğal dil işleme, iş ve zekâ için önemli olan bilgileri edinmede önemli bir rol oynamaktadır. Bu amaçla doğal dil işleme alanında yapılan çalışmalar büyük önem taşımaktadır (Yapıcı vd., 2019).

Doğal dil işleme, insan dilini (temelde bir metin bloğunu) bilgisayarların anlayabileceği, işleyebileceği ve kalıp üretebileceği bir dile dönüştürme yeteneğine sahip bir tür yapay zekâ dalıdır (Yang vd., 2021). Hesaplamalı dilbilim olarak da bilinen doğal dil işleme alanı, insan dillerini anlamada pratik problemleri çözmek için hesaplamalı modellerin ve süreçlerin mühendisliğini içermektedir. Son yıllarda doğal dil işleme alanı derin öğrenme modellerinin kullanımının artması ile birlikte daha fazla gelişim göstermektedir. Şu anda doğal dil işleme, makine öğrenimi ile birlikte istatistiksel ve olasılıksal hesaplamaları kullanan veri odaklı bir alandır. Geçtiğimiz birkaç yılda doğal dil işlemeye olan yaklaşım sinir ağları modelleri ile geliştirilmektedir (Otter vd., 2020).

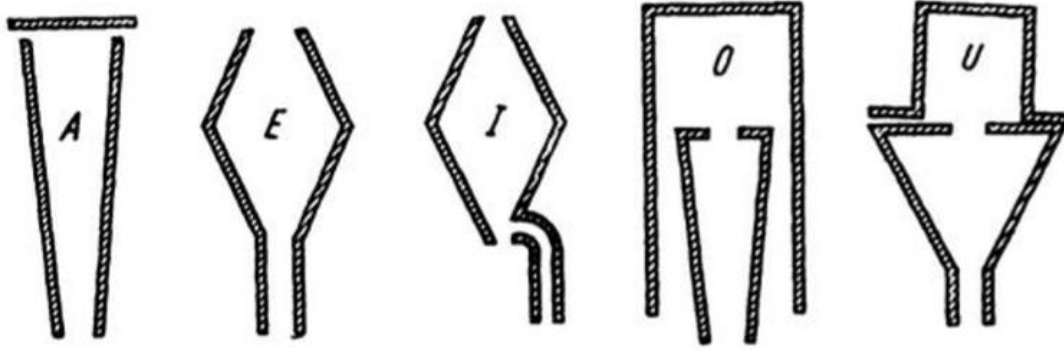
Doğal dil işleme çalışmaları; dil bağımlı ve dilden bağımsız çalışmalar olmak üzere iki kategoride yürütülmektedir. Dilden bağımsız çalışmalar istatistiksel yöntemlerle ve makine öğrenmesi yoluyla yapılmaktadır (Kul, 2020). Metin sentezleme işleminde seslendirilen metnin doğru ve anlaşılır bir biçimde elde edilmesi, çalışmadan elde edilen verim açısından önemlidir. Dil bağımlı çalışmalar için ilk olarak dilin biçim bilimsel analizinin iyi yapılması gerekmektedir.

Metinden konuşma sentezleme uygulamalarının en verimli şekli, insanın doğal konuşmasındaki vurgu ve tonlamalara en yakın konuşmanın üretilmesidir. Metinden konuşma sentezlemenin performansını ölçmek için önemli göstergeler arasında anlaşılabilirlik ve doğallık yer almaktadır. Derin sinir ağı teknolojisinin gelişmesi, büyük metinsel konuşma veri kaynaklarının birikmesi ve bilgi işlem gücünün iyileştirilmesiyle, derin öğrenmeye dayalı metinden konuşma sentezleme fikri ana akım haline gelmiştir ve sentetik konuşmanın anlaşılabilirliği ve doğallığı gelişme kaydetmiştir (Li vd., 2021). Doğal dillerin analizinin yapılması ve bunun yardımcı bir teknolojiye öğretilmesi ise doğal dil işleme teknikleriyle mümkündür. Bu çalışmanın amacı metinden konuşma sentezleme sistemlerinde insan konuşmasına yakın bir konuşma şeklinin nasıl sağlanabileceğine dair bir inceleme sunmaktır. Aynı zamanda bu çalışma, metinden konuşma sentezleme sistemlerine doğal dil işleme tekniklerinin entegre edilmesi fikrini içermesi bakımından önemlidir.

2. Metinden Konuşma Sentezleme Sistemleri (Text-to-Speech Synthesis Systems)

Metinden konuşma sentezleme sistemlerinin tarihi bilgisayarın icadından sonra başlamıştır, çünkü metinden konuşma sentezleme sistemleri bir bilgisayara ihtiyaç duymaktadır. Bu sistemler metni otomatik olarak konuşmaya çevirebilmelidir. Konuşma sentezi ile ilgili ilk çalışmalar iki yüzyıl öncesine dayanmaktadır; Rus

Profesör Christian Kratzenstein, beş uzun ünlü (a, e, i, o, u) arasındaki fizyolojik farklılıkları anlatıp bu sesleri 1779'da St. Petersburg'da yapay olarak üreten bir sistem oluşturmuştur (Schroeder, 1972).

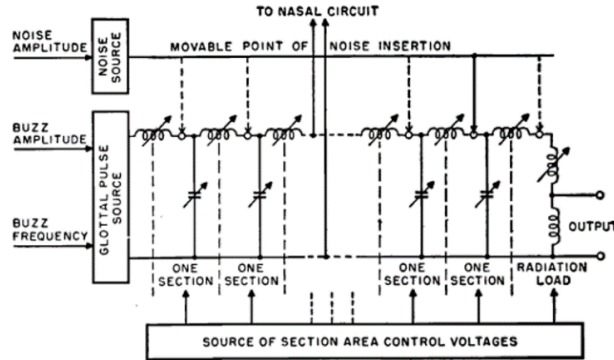


Şekil 1. Kratzenstein'in Çalışmasının Gösterimi (Demonstration of Kratzenstein's study) (Schroeder, 1972)

Stewart, 1922'de ilk tam elektrik konuşma sentezleme cihazını tanıtmıştır; bu cihazla sadece statik sesli olan sesleri üretebilmiştir, ünsüz seslerin veya bağlı seslerin üretimi bu sistemde mümkün olmamıştır (Klatt, 1987).

İlk konuşma sentezleyicisi olarak kabul edilen cihaz VODER, 1939'da New York'ta Homer Dudley tarafından tanıtılmıştır (Schroeder, 1972). Konuşma kalitesi ve anlaşılabilirlik açısından iyi olmamasına rağmen, yapay konuşma üretimi potansiyeli göstermesi açısından umut vadetmiştir.

İlk artikülasyon model konuşma sentezleyici, George Rosen tarafından 1958'de MIT (Massachusetts Institute of Technology)'de geliştirilmiştir (Klatt, 1987). Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, artikülasyon sentezleyici cihazı DAVO her bölüm için elle ayarlanmış değişken indüktörlere ve kapasitelere sahiptir.



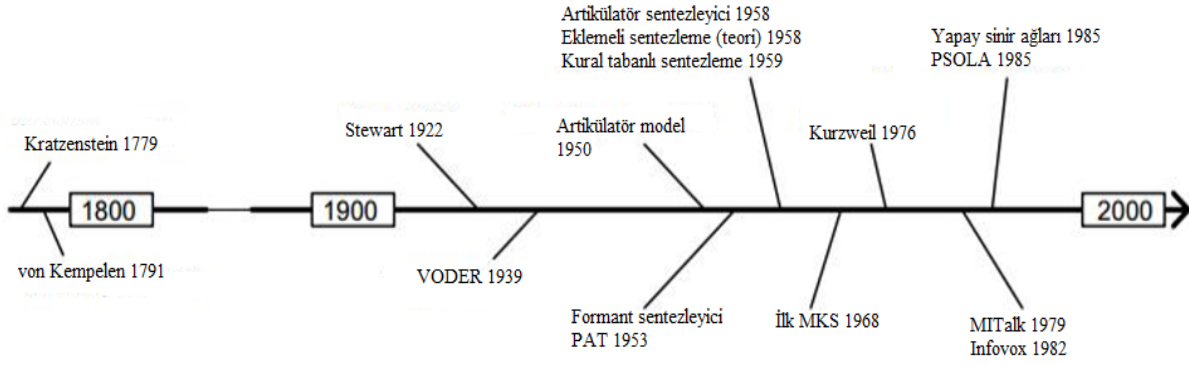
Şekil 2. Konuşma Sentezlemenin İlk Artikülasyon Modeli (The First Articulatory Model Of Speech Synthesis) (Klatt, 1987)

1970'lerin sonunda ve 1980'lerin başında, ticari olarak çok sayıda metinden konuşma sentezleme sistemi üretilmiştir. Bilgisayarda çalışan yazılım ürünlerinin yanında donanım çözümleri de sunan farklı metinden konuşma sentezleme çipleri üretilmiştir. Bugünlerden sonra, başarılı sayılabilecek birçok metinden konuşma sentezleme sistemi farklı diller için oluşturulmuştur. Bu uygulamalar ticari ve ticari olmayan amaçlarla kullanılmıştır (Sel, 2013). Bu kapsamdaki en bilinen uygulamalar Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Dünyadaki Temel Metinden Konuşma Sentezleme Sistemleri (Basic Text-To-Speech Synthesis Systems In The World) (Sel, 2013)

ÇALIŞMA	TARİH	YÖNTEM
ASY	1960'lar	Söyleyiş sentezleyici
MITalk	1979	Formant sentezleyici
Infovox	1982	Formant sentezleyici
Bell Labs TTS	1973	Çift / üçlü ses ekleme
ETI Eloquence	1988	Eklemeli sentezleme
CNET PSOLA	1980'lerin ortaları	Çift ses ekleme
Festival TTS	1990'ların sonları	Çift ses ekleme
MBROLA	1990'ların sonları	Çift ses ekleme
Whistler	2000'ler	Hece ekleme

Şekil 3'te metinden konuşma sentezleme sistemlerinin tarihsel zaman çizelgesi verilmiştir.



Şekil 3. Tarihsel Zaman Çizelgesi (Historical Timeline) (Şentürk, 2010)

İngilizce için metinden konuşma sentezleme sistemlerinin geliştirilmesinden sonra dünyada konuşulan diğer diller için de metinden konuşma sentezleme sistemleri ortaya çıkmaya başlamıştır. Aynı sentez teknikleri kullanılmasına rağmen, uygulamalar, ilgili dilin özelliklerine göre değişiklik göstermiştir (Sel, 2013). Bugün, modern teknolojinin avantajlarından yararlanılarak, yeni konuşma sentezleme sistemleri geliştirilmeye devam edilmektedir.

Engellilik durumuna bakılmaksızın tüm insanlar, kişisel ve sosyal hedeflere ulaşmanın bir yolu olarak okuma etkinliklerine katılırlar. Bunun bir yolu da metinden konuşma sentezleme sistemleridir. Metinden konuşma sentezleme sistemleri, yazılı materyallerin işlenmesini kolaylaştırabilen teknoloji tabanlı desteklerdir (Wallace vd., 2021). Bu sistemler yeni nesil insan-makine etkileşiminin önemli bir bileşenidir.

Genel olarak metinden konuşma sentezleme sistemlerinde 3 çeşit yaklaşım vardır. Bu yaklaşımlardan birincisi kural tabanlı formant sentezleyiciler, ikincisi söyleyiş sentezleyicileri, üçüncüsü ise eklemeli sentezleyicilerdir (Sel vd., 2011).

Kural tabanlı formant sentezleyiciler konuşma sinyalinin doğrusal ön görümlü kodlaması temeline dayanır. Söyleyiş sentezleyicileri sadece formant frekansların denetimine ihtiyaç duyar. Eklemeli sentezleyiciler ise önceden kaydedilmiş olan ses birimlerini bir araya getirerek konuşmayı oluşturur. Seslerin bir araya getirilmesi sinyal işleme ile gerçekleşir.

Türkçe MKS sistemlerinde genel olarak izlenen yol; Türkçe dilinin yapısından dolayı, yani eklemeli bir dil olduğundan dolayı, eklemeli yöntemlerdir. Benzer çalışmalar incelendiğinde genelde bu yöntemin kullanıldığı görülmüştür. Yine bu çalışmalardan bazıları eklenecek parçalar olarak ikili, üçlü fonemleri kullanmıştır. Genel olarak literatür incelendiğinde Türkçenin en küçük yapı taşının hece olduğu ve heceler yardımıyla bir kelimedenden çokça kelimeler üretildiği de bilinmektedir. O yüzden birleştirilecek seslerin hecelerden seçilmesi daha uygun olmaktadır (Sel, 2013).

Eklemeli sentezleyicilerde ilk önce ses veri tabanı hazırlanır. Daha sonra metin metnin ön incelemesine alınır. Burada metnin içerdiği sayılar, noktalama işaretleri vs. incelenir. Daha sonra metin parçalara ayrılır ve konuşma veri tabanındaki seslerle sayısal sinyal işlemeye alınır. Seslendirme kuralları da işlenerek konuşmaya çevrilir.

Metinden konuşma sentezleme sistemleri genel olarak beş basamaktan oluşmaktadır. Bu basamaklar aşağıda sıralanmıştır.

- **Metin Ön İşlemleri:** Bu aşamada sayılar, tarihler, kısaltmalar, kesirler gibi ifadelerin konuşma dilindeki sözcüklere dönüştürülmesi gerekir. Bu işleme normalizasyon da denilmektedir. Ön işleme aşamasında noktalama işaretleri de tespit edilir.
- **Metnin Hecelere Ayrılması:** Türkçe metinden konuşma sentezleme çalışmalarında okunacak metnin hecelere ayrılması için çok fazla algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmaların hepsi içerdiği çalışma alanı doğrultusunda başarılıdır.
- **Sesler:** Ön işlemde geçerek hecelere ayrılan metnin bir sonraki aşaması eklemeli yöntem kullanılarak hecelerin birleştirilmesidir.
- **Seslerin Veri Tabanına Kaydedilmesi:** Sesler veri tabanına heceler şeklinde kaydedilir.
- **Seslerin Birleştirilmesi:** Eklemeli metinden konuşma sentezleme çalışmalarında daha önceden kaydedilmiş farklı tonlamadaki sesleri birbirlerine istenilen ton ve süre ile bağlamak ve bir süreklilik kazandırmak için zaman

ölçeği modifikasyonları kullanılmaktadır.

3. Verilerin Toplanması (Collection of Data)

Bu çalışmada, Türkçe metinden konuşma sentezleme konusu ile ilgili çalışmalar incelenmiştir. Araştırmanın sınırlılıkları doğrultusunda çalışma kapsamına dâhil edilen tez, makale ve bildiri sayısı 24'tür. Bu sınırlılıklar aşağıda sıralanmıştır.

- 2002 yılı ve sonrasında yapılan çalışmalar araştırmaya dâhil edilmiştir.
- Özellikle bir uygulama geliştirilmiş ve kullanıcı üzerinde test edilmiş çalışmalarla, mevcut yazılımların iyileştirilmesi için fikir öne süren çalışmalar araştırma kapsamına alınmıştır.
- Araştırmaya dâhil edilen tezler, Yükseköğretim Kurulu Başkanlığı Tez Merkezi'nden alınmıştır ve erişime açık olanlar araştırma kapsamına dâhil edilmiştir.

Türkçe metin sentezlemeye yönelik çalışmalar iki grupta incelenebilir. İlk grupta yapılan çalışmalar doğal dil işleme yöntemlerini kullanan çalışmalardır. İkinci grupta açıklanan çalışmalar ise klasik metinden konuşma sentezleme yöntemlerini kullanan çalışmalardır. Bu doğrultuda, araştırmamız kapsamına giren 24 çalışma iki başlık altında incelenecektir.

3.1. Doğal Dil İşleme Modülü Kullanan Metinden Konuşma Sentezleme Çalışmaları (Text-to-Speech Synthesis Studies Using Natural Language Processing Module)

Bu grupta incelenen çalışmalar, metin analizi aşamasında doğal dil işleme modülünden faydalanmış, çalışmanın test aşamasında doğal dil işlemeden faydalanılması gerektiği sonucunu bulan veya yapay zekâ tekniklerini kullanan çalışmalardır. 24 çalışmadan 10'u bu grup kapsamına girmektedir.

Uzun (2007), "Görme Engelliler İçin Basılı Doküman Yorumlama ve Seslendirme Sisteminin Gerçekleştirilmesi" isimli bir çalışma yapmıştır. Geliştirilen sistemde kullanılan yöntem ve algoritmaların tamamı C++ Builder ortamında uygulanmıştır. Geliştirilen sistem ile metin, grafik ve tablo gibi görüntülerin de sesli olarak aktarımı sağlanmıştır. Bunun için de Yapay Sinir Ağları (YSA) teknolojisine başvurulmuştur. Yapay zekâ algoritmalarına başvurulması açısından, bu çalışma diğer çalışmalardan farklılık oluşturmaktadır.

Görmez (2009), gerçekleştirdiği "Makine Öğrenme Algoritmalarıyla Türkçe Metin Seslendirme Sistemi Yazılımı" isimli çalışmada; metni sese çeviren bir yazılım geliştirmiştir. Eklemeli sentezleme yöntemi kullanılmıştır. Birleştirme aşamasında yumuşak geçişlerin sağlanabilmesi için PSOLA (Pitch Synchronous Overlap and Add) algoritmasından yararlanılmıştır. Araştırmacı, metin sentezlemenin bilgisayar bilimleri taksonomisinde doğal dil işleme altında olduğunu ve metinden konuşma sentezlemeyi anlamak için doğal dil işlemeyi anlamak gerektiğini savunmuştur. Bu yüzden çalışmayı doğal dil işleme modülü ve dijital sinyal işleme modülü olarak iki modülde ele almıştır.

Şentürk (2010), gerçekleştirdiği "Türkçe Metin Seslendirme" isimli çalışmada hece eklemeli yöntem kullanmıştır. Birleştirilen hecelerin uzunluk ve duraksama sürelerinin ayarlanabilmesi sağlanmıştır. Aynı çalışmada, görme engelliler için klavyeden girilen ifadeleri seslendiren metin düzenleme programı da hazırlanmıştır. Geliştirilen sistemde anlaşılabilirlik ve ses seviyesinde olumlu yönde bulgular elde edilmiştir. Doğal dil işleme çalışmalarının bu sisteme eklenmesiyle daha doğal seslerin elde edilebileceği vurgulanmıştır.

Bicil (2010), gerçekleştirdiği "Türkçe Metinden Konuşma Sentezleme" isimli çalışmada; Türkçe ses kümesi oluşturmuş ve ikili ve üçlü sesleri kullanan eklemeli sentezleyici ile bir sentezleme sistemi geliştirmiştir. Çalışmada, metinden konuşma sentezleme sistemlerinin, sinyal işlemeden önceki metin ön işleme ve normalizasyon aşamalarına ihtiyaç duyulduğundan, doğal dil işlemenin kullanım alanlarından biri olarak kabul edilebileceği belirtilmiştir.

Güner (2013), "Morfolojik Olarak Zengin Diller İçin Melez İstatistiksel/Birim Seçmeli Metinden Konuşma Sentezleme Sistemi" isimli çalışmasında; birim seçmeli metinden konuşma sentezleme (BMKS) ve saklı markov modeli tabanlı metinden konuşma sentezleme (SMKS) tekniklerini karşılaştırmış ve BMKS'de ortaya çıkan seslendirmedeki süreksizlik probleminin SMKs sistemlerinde yaşanmadığı tespit etmiştir. BMKS'de daha büyük veri tabanı kullanıldığı için de ses kalitesinin daha iyi olduğu belirtilmiştir. Bu yüzden morfolojik olarak zengin diller için bu iki sistemden de özellikler alan bir melez metinden konuşma sentezleme sistemi önerilmiştir.

Şentürk ve Adalı (2016), yazdıkları "Türkçe Metin Seslendirme" isimli makalede; iki farklı yöntem incelemiştir. Bu sistemde, çift-ses eklemeli yöntemde seslendirilen metnin doğallıktan uzak olduğu tespit edilince hece eklemeli

yöntem kullanılmıştır. Aynı zamanda daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırılabilirliği ve yapıları müdahale edilebilirliğini sağlamak amacıyla XML (Extensible Markup Language) biçiminde kullanıcıya sunulmuştur. Özellikle bu nokta, makalenin önemli bir katkı sunmuş olduğu noktalardan biridir. Aynı çalışmada; görme engelliler için metin düzenleyici program da geliştirilmiştir. Klavyeden girilen her ifadenin sesli olarak iletilmesi sağlanmıştır. Farklı yaş gruplarından dinleyicilerle yapılan deneylerde hece eklemeli yöntemin kullanıldığı sistemin anlaşılabilirlik oranı %96.1 olarak ölçülmüştür.

Ayaz (2016), “DSP Kartı Kullanarak Türkçe Metinden Konuşma Sentezleme” isimli çalışmada; DSP kartı ile metinden konuşma üreten bağımsız bir sistem geliştirmiştir. Yazılımın geliştirilmesi Matlab ortamında sağlanmıştır. Girdi olarak alınan metin, metin çözümlemesi işleminden geçirilip hecelenmiş, sentezlenmek üzere DSP kartına gönderilmiştir. Anlaşılabilirlik ve doğallık açısından ortalama bir sonuç alındığı belirtilmiştir.

Kutlugün (2017), “Gözetimli Makine Öğrenmesi Yoluyla Türe Göre Metinden Ses Sentezleme” isimli çalışmada, metinleri önışlemden geçirerek sınıflandırma işlemi yapmıştır. Bu sınıflandırma işlemi için makine öğrenmesi teknikleri kullanılmıştır. Metin türlerinin hangi ses tonlaması ile seslendirileceği belirlenmiştir. Varsayılan olarak belirlenen seslendirmelerin dışında bir ton ile karşılaşıldığında yanlış sınıflandırma yapıldığı tespit edilmiştir. Gelecek çalışmalara katkı sağlanabilmesi için, farklı veri temizleme ve kelimelerin köklerini bulma algoritmalarının kullanılması önerilmiştir.

Kutlugün ve Şirin (2018), “Metinden Konuşma Sentezinde Yeni Bir Geliştirme Çerçevesi Yaklaşımı” isimli çalışmalarında, metinsel ifadelerin yapay ve monoton bir şekilde seslendirilmesi yerine, metnin türlere ayrılarak her bir türün kendine göre ses biçimleriyle seslendirilmesini hedeflemiştir. Bu amacı gerçekleştirmek için makine öğrenmesi algoritmalarından yararlanmışlardır. Yanlış sınıflandırılan metin belgelerinin kendi kategorileri dışında bir ses biçiminin elde edildiğini belirtmişlerdir.

Kul (2020), “Türkçe Ders Anlatan Yapay Zekâya Giden Yolda Doğal Dil İşleme” isimli çalışmada; makinelerin, öğretmenlerin yerine geçebilmesi için konuşulan dili anlayabilmesi gerektiği fikrinden yola çıkmıştır. Bu amaç doğrultusunda çalışmasını; konuşma tanıma, el yazısı tanıma, yazım yanlışlarının düzeltilmesi, metni özetleme, cümleyi öğelerine ayırma, bilgi çıkarımı, soru tespiti ve yazıyı seslendirme olarak adım adım açıklamıştır. Yol haritasındaki yapay zekâ modülünün, öğrenci tarafından sorulan soruların tespiti ve verilecek cevabın değerlendirilmesi için önemli olduğunu ifade etmiştir.

3.2. Klasik Yöntemleri Kullanan Metinden Konuşma Sentezleme Çalışmaları (Text-to-Speech Synthesis Studies Using Classical Methods)

Bu grupta incelenen çalışmalar metinden konuşma sentezleme yöntemlerini kullanan ve bu yöntemlere ek olarak iyileştirme algoritmaları geliştiren çalışmalardır. Ses veri tabanında geliştirmeler yaparak verimi arttırmayı hedefleyen çalışmalar da bu grupta incelenmiştir. Araştırma kapsamındaki 24 çalışmadan 14’ü bu grup kapsamındadır.

Eker (2002), “Türkçe Metin Seslendirme” isimli çalışmada; girdi olarak metni alan ve çıktı olarak bu metne karşılık gelen seslerin verildiği bir sistem tasarlamıştır. En küçük birim olarak difonlar kullanılmıştır. İkili fonem birleştirme tekniği kullanılmıştır. Geliştirme ortamı olarak Matlab tercih edilmiştir. Seslerin birleştirilmesi için de PSOLA algoritması kullanılmıştır. Test aşamasında, uzun cümlelerin seslendirilmesinde karşılaşılan performans zayıflığından dolayı sistemin daha hızlı olması gerektiği ve konuşmanın daha doğal olması için iyi bir metin işlemcisine ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir.

Ünalı (2007), gerçekleştirdiği “Taşınabilir Cihazlar İçin Türkçe Metinden Konuşma Sentezleme Sistemi” isimli çalışmada; J2ME platformunu destekleyen bir mobil cihaz üzerinde çalışabilen ve kısa mesajları sesli olarak okuyabilen bir yazılım geliştirmiştir. Difonları birleştirerek sentezleyen TD-PSOLA (Time Domain- Pitch Synchronous Overlap and Add) algoritması ile Java 2 Platformu kullanılmıştır. Sistemin daha hızlı çalışabilmesi için daha yüksek kapasiteli bir işlemciye gereksinim duyulduğu ve bu işlemci sayesinde daha büyük veri tabanları ile çalışılabileceği belirtilmiştir.

Aşlıyan ve Günel (2008), tarafından yazılan “Türkçe Metinler İçin Hece Tabanlı Konuşma Sentezleme Sistemi” isimli makalede; metni konuşmaya çeviren bir sistem tasarlanmıştır. Geliştirilen sistemde en küçük ses birimi olarak heceler kullanılmıştır. Test edilen sistem ortalama bir puan almıştır. Seslendirilen metnin iyi anlaşıldığı fakat vurgu ve tonlamalarda iyileştirmeler yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Yılmaz (2009), tarafından yapılan “Türkçe Metinden Konuşma Sentezleme Uygulamaları İçin Bir Veri Sözlük Seti ve Yazılım Çerçevesi” isimli çalışmada; metinden konuşma sentezleme sistemleri için altyapı niteliğinde bir veri

sözlük seti ve yazılım çerçevesi tanıtılmıştır. Bu altyapı; metin içerisindeki kısaltmaların, sayıların vs. doğru bir şekilde okunabilmesini sağlamaktadır.

Güldalı (2009), tarafından yapılan Türkçe Metin Seslendirme isimli çalışmada; ses birimi olarak heceyi kullanan ve eklemeli sentezleme tekniği kullanan bir sistem geliştirilmiştir. Girdi metni alınıp boşluklardan ve satır başlarından arındırılmıştır. Tek tek kelimeler tespit edilmiştir ve bu kelimeler hecelerine ayrılıp liste yapısında tutulmuştur. Kelimedeki her hece için veri tabanından ilgili ses dosyası getirilmiştir. Eklemeli sentezleme algoritmasıyla da oluşturulan ses dosyasının seslendirme işlemi yapılmıştır. Yapılan testlerde anlaşılabilirlik açısından ortalamanın üzerinde sonuçlar elde edilmiştir.

Erdemir (2010), tarafından yapılan “Türkçe Metin Seslendirme İçin Doğal Konuşma Sentezleme” isimli çalışmada; metni seslendirmeye yarayan bir çalışmanın adımları açıklanmıştır. Parçacık birimi olarak “en çok iki harfli hece” mantığı kullanılmıştır ve bu parçacıkların art arda eklenmesiyle sentezleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerin sonuçlarına göre anlaşılabilirlik %91, doğallık ise %74 olarak belirlenmiştir.

Uslu (2010), tarafından yazılan “Metinden Konuşma Sentezleme” isimli çalışmada; temel bir metinden konuşma sentezleme sisteminin yapısı incelenmiş ve hayata geçirilmesi gereken uygulamalar tespit edilmiştir. Elde edilen konuşmanın kalitesinin ve doğallığının önemli bir faktör olduğu belirtilmiş ve ileride yapılacak olan çalışmalarda özellikle bu konulara eğilim gösterilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Sel vd., (2011), tarafından yapılan “Beyin Bilgisayar Arayüzleri İçin Türkçe Metinden Konuşma Sentezleme Sistemi” isimli çalışmada; konuşma veya hareket etme yeteneği olmayan engellilere yönelik bir Türkçe metinden konuşma sentezleme sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemde, girdi olarak alınan metnin anlamsal olarak incelenmediği ve bu yüzden Türkçeye özgü ses değişimlerinin kaliteli bir şekilde okunmadığı saptanmıştır.

Arık (2011), “Görme Engelliler İçin Bilgisayar Kullanımının Etkinleştirilmesi, Erişilebilirlik ve Bir Türkçe Hece Tabanlı Konuşma Sentezleme Sisteminin Geliştirilmesi” isimli çalışmada; eklemeli sentezleme yöntemi kullanarak hece tabanlı bir metinden konuşma sentezleme sistemi geliştirmiştir. Yapılan testlerde kalitenin ortalamanın üzerinde olduğu saptanmıştır. Kullanıcı üzerinde yapılan testlerde ise ses kalitesinin daha iyi olması gerektiği, seslerin diksiyonu düzgün bir konuşmacı tarafından seslendirilmesi gerektiği ve vurgusal anlamda iyileştirilmeler yapılması gerektiği sonuçları elde edilmiştir.

Tekindal ve Arık (2012), tarafından yapılan “Görme Engelliler İçin Türkçe Metinden Konuşma Sentezleme Yazılımı Geliştirilmesi” isimli çalışmada; eklemeli sentezleme yöntemini kullanan bir metin okuyucu yazılımı geliştirilmiştir. Çalışma, elektronik ortamda bulunan bir dokümanı insan sesine yakın bir ses ile konuşmaya çevirebilmektedir. Görme kaybı olan 10 kişi üzerinde testler yapılmış ve vurgunun daha fazla iyileştirilmesi gerektiği, aynı zamanda hece ses dosyalarının kayıtlarının daha kaliteli bir ses kayıt ortamında yapılması gerektiği saptanmıştır.

Sel (2013), tarafından yapılan “Türkçe Metinler İçin Hece Tabanlı Metinden Konuşma Sentezleme Sistemi” isimli çalışmada; eklemeli sentezleme yöntemini kullanan bir metinden konuşma sentezleme yazılımı geliştirilmiştir. Temel olarak iki sistem oluşturulmuştur. İlk sistemde sentezleme işlemi hece tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. İkinci sistem ise nesne tabanlı hazırlanmış ve seslendirilecek bölüm olarak difon veri tabanı kullanılmıştır. Ulama, ünsüz benzeşmesi, ünsüz yumuşaması gibi Türkçeye özgü kuralların sisteme dâhil edilmesi gerektiği, vurgu ve tonlamalarda eksiklikler olduğu ve bunların giderilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Karamehmet (2015), tarafından yapılan “RC8660 Ses Sentezleyici ile Türkçe Metinden Konuşma Sentezleme” isimli çalışmada; yeni bir harici sözlük tanımlanmış ve doğru heceleme için gereken kurallar bu sözlüğe entegre edilmiştir. RC 8660 kartı, çıkış sesini kontrol edebilen bir özelliğe sahiptir. Ses seviyesi, hız, karakter aralığı, yankı, ton gibi etkenler istenilen düzeyde ayarlanabilmektedir. Geliştirilen sistemin engellilere yardımcı olabilmesi için diğer sistemlere (e-kitap okuyucuları, ATM makineleri, navigasyon sistemleri vs.) de uygulanması gerektiği belirtilmiştir.

Uysal (2017), “Eklemeli Sentezleyici Yöntemi Kullanılarak Türkçe Metinden Konuşma Sentezleme” isimli çalışmada, konuşma sentezi için eklemeli sentezleme yöntemini kullanmıştır. Geliştirilen uygulama C# programlama dilinde gerçekleştirilmiştir. Sentez için gerekli konuşma parçaları, sabit bir veri tabanı yerine sürekli güncellenebilen bir veri tabanı kullanılarak elde edilmiştir. Gelecekteki çalışmaların, güncellenen veri tabanının internet bağlantısı olmadan da kullanılabilmesi yönünde olabileceği belirtilmiştir.

Tora vd., (2017), “Implementation of Turkish Text-To-Speech Synthesis On A Voice Synthesizer Card With Prosodic Features” isimli çalışmalarında; Türkçe metin okuma sentezini bir ses sentezleyici kart ile

gerçekleştirmişlerdir. Tasarladıkları sistemi, daha anlaşılır ve doğal konuşma üretebilmek için bazı prozodik özellikler uygulayarak zenginleştirmişlerdir. Bu özellikler; perde, hız, hacim, gecikme ve tondur. Anlaşılabilirlik testlerinde 5 üzerinden 3,29 puan elde edilmiştir. Geliştirilen sistemin, konuşma teknolojisi ile ilgilenen araştırmacılar için bir test ortamı olarak kullanılabilceği belirtilmiştir.

4. Bulgular (Findings)

Çalışma yapıları, kullandıkları algoritmalar, heceleri/sesleri birleştirme ve kesimleme yöntemleri, çalışmanın sahibi/sahipleri, çalışmanın yapıldığı yıl ve kullanılan programlama dilleri incelenen çalışmalar Tablo 2'de gösterilmiştir. Çalışma içerisinde belirtilmeyen veya kullanılmayan ifadeler "-" sembolü ile gösterilmiştir.

Tablo 2. Çalışmaların Karşılaştırılması (Comparison of Studies)

YIL	YAZAR	ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ	SENTEZLEME YÖNTEMİ	BİRLEŞTİRME ALGORİTMASI	PROGRAMLAMA DİLİ VE GELİŞTİRME ORTAMI
2002	Barış Eker	Klasik	İkili fonem birleştirme	PSOLA	MATLAB
2007	İlker Ünalı	Klasik	Difonları birleştirme	TD-PSOLA	Java 2 - J2ME
2007	Emre Uzun	Yapay Zekâ/DDİ	Heceleri birleştirme	-	C++ Builder
2008	Rıfat Aşlıyan, Korhan Günel	Klasik	Heceleri birleştirme	TD-PSOLA	C++
2009	Asım Egemen Yılmaz	Klasik	Yeni hece türleri tanımlama	-	-
2009	Zeliha Görmez	Yapay Zekâ/DDİ	Eklemeli sentezleme	PSOLA	K * (Kstar) algoritması
2009	Kenan Güldalı	Klasik	Eklemeli sentezleme	-	C
2010	Tuncay Şentürk	Yapay Zekâ/DDİ	Eklemeli sentezleme	-	Eclipse SpringSource Tool Suite - Visual C++
2010	Cavit Erdemir	Klasik	Eklemeli sentezleme	Özel parçacık süre belirleme algoritması	C++, Java - MATLAB
2010	İbrahim Baran Uslu	Klasik	-	-	-
2010	Yücel Bicil	Yapay Zekâ/DDİ	Eklemeli sentezleme	TD-PSOLA	-
2011	İlhami Sel, Davut Hanbay, Murat Karabatak	Klasik	Eklemeli sentezleme	-	Microsoft.NET 2.0 - MS Visual C#
2011	Güray Arık	Klasik	Eklemeli sentezleme	-	Visual C#.NET
2012	Benian Tekindal, Güray Arık	Klasik	Eklemeli sentezleme	-	Visual C#.NET - Visual Studio 2008
2013	İlhami Sel	Klasik	Eklemeli sentezleme	SOLA	Matlab, C#
2013	Ekrem Güner	Yapay Zekâ/DDİ	Eklemeli sentezleme	-	Saklı Markov Modeli Tabanlı
2015	Timur Karam Mehmet	Klasik	Eklemeli sentezleme	-	RCStudio
2016	Tuncay Şentürk, Eşref Adalı	Yapay Zekâ/DDİ	Hece eklemeli yöntem	XML dosyası	-
2016	Uğur Ayaz	Yapay Zekâ/DDİ	DSP Kartı	-	Matlab
2017	Fatih Uysal	Klasik	Eklemeli Sentezleme	-	C#
2017	Hakan Tora, İbrahim Baran Uslu, Timur Karam Mehmet	Klasik	Sentezleyici Kart (RC8660)	-	RCStudio
2017	Mehmet Ali Kutlugün	Yapay Zekâ/DDİ	Metin Sınıflandırma	-	Java, NetBeans
2018	Mehmet Ali Kutlugün, Yahya Şirin	Yapay Zekâ/DDİ	Metin Sınıflandırma	-	FreeTTS, MBROLA
2020	Sinan Kul	Yapay Zekâ/DDİ	-	-	-

Türkçe metinden konuşma sentezleme sistemleriyle alakalı yapılan çalışmaların %62'lik bir kısmını 15 çalışma ile tez çalışmaları oluşturmaktadır. Araştırmaya dâhil edilmiş olan çalışmaların yayın türlerine göre dağılımı Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Çalışmaların Yayın Türüne Göre Frekans ve Yüzde Değerleri (Frequency and Percentage Values of Studies According to the Publication Type)

YAYIN TÜRÜ	FREKANS	YÜZDE DEĞERİ
Tez	15	62,5%
Makale	8	33,3%
Bildiri	1	4,2%

Araştırma kapsamındaki 24 tezin hiçbirinde doğrudan doğal dil işleme tekniklerinin kullanıldığı görülmemiştir. 24 çalışmanın 10'unda sadece metin işleme sürecinde doğal dil işleme modülü kullanılmış veya diğer yapay zekâ teknolojilerinden yararlanılmıştır. Vurgu ve tonlamaların iyileştirilmesi gerektiğini savunan çalışmaların öneriler kısmında doğal dil işleme konusunun Türkçe metinden konuşma sentezleme sistemlerine entegre edilmesi gerektiğini savunan araştırmacılar vardır.

Türkçe yapısı gereği sondan eklemeli bir dil olduğu için sentezleme yöntemi olarak büyük çoğunlukla eklemeli sentezleme yöntemi kullanılmıştır. İncelenen çalışmaların büyük çoğunluğunda bu yöntemin kullanılması, doğru olan tekniğin bu olduğunu göstermektedir. Eklemeli sentezleme/hece eklemeli yöntem kullanan araştırmacılar, sentezlenen cümlelerin anlaşılabilirliğinin iyi seviyede olduğunu kaydetmişlerdir. 24 çalışmanın 14'ü; yani araştırmaya dâhil edilen çalışmaların yaklaşık %58'i bu sentezleme yöntemini kullanmıştır. 2007 yılı ve sonrasındaki çalışmalarda neredeyse sadece bu yöntemin kullanıldığı görülmüştür.

Türkçe metinden konuşma sentezleme sistemlerinde kullanılan programlama dilleri değişkenlik göstermektedir. Bu durum bize, çalışmadan elde edilen sonucun, kullanılan programlama dili ile doğrudan bir bağlantısı olmadığını ve farklı programlama dillerinin aynı sonucu verebileceğini göstermiştir. Araştırmaya dâhil edilen çalışmalarda en çok kullanılan programlama dillerinin MATLAB, C/C++, Java ve C# olduğu görülmüştür.

Tablo 4'te kullanılan programlama dilleri verilmiştir. En fazla kullanılan programlama dilinin C/C++ ve C# olduğu görülmüştür.

Tablo 4. En Çok Kullanılan Programlama Dilleri (Most Used Programming Languages)

KULLANILAN PROGRAMLAMA DİLİ	SAYI	YÜZDE
C/C++	5	%20,8
MATLAB	4	%16,6
C#	5	%20,8
Java	3	%12,5

Doğal dil işleme veya yapay zekâ modülünden faydalanan çalışmacıların elde ettiği başarılar incelendiği zaman, sentezlenen konuşmanın anlaşılabilirliği yüksek, vurgu ve tonlamalarının ise yeterli seviyede olduğu sonucuna varılmıştır. Standart bir metinden konuşma sentezleme sisteminde genel olarak anlaşılabilirliğin iyi fakat insan konuşmasına yakın vurgu ve tonlamaların eksik olduğu belirtilmiştir. Çalışmacılar bu durumun iyileştirilmesinin; doğal dil işleme bilimi ile mümkün olduğunu savunmaktadır. Bu anlamda; gelecekteki çalışmalarda, metinden konuşma sentezleme çalışmalarının doğal dil işleme teknikleriyle yapılması önerilmektedir.

Tablo 5'te en çok kullanılan sentezleme yöntemi, birleştirme algoritması ve programlama dili, adet ve yüzde bazında gösterilmiştir.

Tablo 5. Çalışmaların Genel Özeti (General Summary Of The Studies)

EN ÇOK KULLANILAN SENTEZLEME YÖNTEMİ	EN ÇOK KULLANILAN BİRLEŞTİRME ALGORİTMASI	EN ÇOK KULLANILAN PROGRAMLAMA DİLİ
C/C++Eklemeli Sentezleme (14 Adet - %58)	TD-PSOLA (3 adet - %12,5)	C/C++ ve C# (5'er adet - %20,8)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Doğal dil işleme, dillerin bilgisayar vasıtasıyla işlendiği ve bilgisayar-insan etkileşimini kolaylaştırmayı amaçlayan bir yapay zekâ dalıdır. Metinden konuşma sentezleme sistemleri ise en basit tabiriyle, bilgisayardaki yazılı metni sesli olarak okumayı sağlamaktadır. Metinden konuşma sentezleme sistemleri günümüzde birçok cihazda kullanılmaktadır. Türkçe sondan eklemeli bir dil olduğu için genellikle bu çalışmalarda eklemeli sentezleme yöntemi tercih edilmiştir. Metinden konuşma sentezleme sistemlerinin ilk aşaması Türkçede var olan hece tiplerini belirleyip, bu hecelerin bir konuşmacı yardımıyla seslendirilerek ses veri tabanına kaydedilmesidir. Daha sonra bir heceleme algoritması ile metin hecelere ayrılır ve kaydedilen seslerle eşleştirilip metin seslendirilir. Bu kısma kadar bütün metinden konuşma sentezleme çalışmaları birbirine benzemektedir. Ancak üretilen konuşma, insanın doğal konuşmasındaki vurgu ve tonlamalara ne kadar benzetilmeye çalışılırsa çalışsın tamamen aynı olmamaktadır. Bu durum bazen anlam kargaşalarına sebep olmaktadır. İncelenen çalışmalardan elde edilen sonuçlar da bu durumu doğrulamaktadır. Cümlelerin anlamını en iyi şekilde anlamamızı sağlayan şey konuşmadaki vurgu ve tonlamalardır. Bu ise, doğal dil işleme teknikleri ile sağlanabilmektedir.

Çalışma kapsamında, Türkçe metinden konuşma sentezleme sistemleri hakkındaki literatür incelenmiştir. Türkçe metinden konuşma sentezleme sistemlerinde genel olarak karşılaşılan sorunlar ve eksiklikler saptanmıştır. Türkçe metinden konuşma sentezleme konusunda yapılan literatür taraması ve araştırmanın sınırlılıkları doğrultusunda çalışma kapsamına dâhil edilen tez, makale ve bildiri sayısı 24'tür.

Türkçe yapısı gereği sondan eklemeli bir dil olduğu için sentezleme yöntemi olarak büyük çoğunlukla eklemeli sentezleme yöntemi kullanılmıştır. İncelenen çalışmaların büyük çoğunluğunda bu yöntemin kullanılması, doğru olan tekniğin bu olduğunu göstermektedir. Eklemeli sentezleme/hece eklemeli yöntem kullanan araştırmacılar, sentezlenen cümlelerin anlaşılabilirliğinin iyi seviyede olduğunu kaydetmişlerdir.

Türkçe metinden konuşma sentezleme sistemlerinde kullanılan programlama dilleri değişkenlik göstermektedir. Bu durum bize, çalışmadan elde edilen sonucun, kullanılan programlama dili ile doğrudan bir bağlantısı olmadığını ve farklı programlama dillerinin aynı sonucu verebileceğini göstermiştir. Araştırma kapsamına alınan çalışmalarda en çok kullanılan programlama dillerinin ise C/C++ ve C# olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre standart bir metinden konuşma sentezleme sisteminde genel olarak anlaşılabilirliğin iyi fakat insan konuşmasına yakın vurgu ve tonlamaların eksik olduğu tespit edilmiştir. Bu noktaya değinen çalışmacılar, bu durumun iyileştirilmesinin; doğal dil işleme bilimi ile mümkün olduğunu savunmaktadır. Bu anlamda; gelecekteki çalışmalarda, metinden konuşma sentezleme çalışmalarının doğal dil işleme teknikleriyle yapılması önerilmektedir.

Sözcük anlamını belirginleştirme çalışmaları, Türkçede anlam kargaşasına sebep olabilecek bazı durumların giderilmesini amaçladığı ve gerçekleştirdiği için, bu konuda örnekleri verilen derleme metinlerinin sayısı arttırılmalı ve kullanıma açılmalıdır. Daha verimli ve doğal konuşmaya yakın sentezlenen sonuçlar alınabilmesi için şimdiki derleme metinlerinin sözcük sayısı arttırılmalı ve biçim bilimsel analiziyle çözümlenmesi yapılmış daha geniş yelpazede bir sözlük oluşturulmalıdır. Çünkü şu anki derleme metinlerinde geçen sözcük dağarcığının belli sayıda olduğu görülmüştür. Geliştirilen derleme metinlerinin Türkçe metinden konuşma sentezleme sistemleri ile entegrasyonu de bir başka iyileştirme yolu olarak gösterilebilir.

Gelecekteki metinden konuşma sentezleme çalışmalarının, doğal dil işleme teknikleri ile birlikte yürütülmesi önerilmektedir. Türkçedeki yazılışları aynı fakat anlamları ve okunuşları farklı (sesteş) sözcükler tespit edilmelidir. Geliştirilen sözcük anlamını belirginleştirme derlemeleri ile birlikte bu tip sesteş sözcüklerin okunuşları kaydedilip ses veri tabanında saklanmalıdır. Sözcüklerin cümlede kullanıldıkları anlamına göre doğru okunuşları ise geliştirilen veri tabanından getirilip seslendirilmelidir. Anlaşılabilirliğin iyi olduğu çalışmalarda vurgu ve tonlamaların da iyileştirilmesinin bu yollarla sağlanabileceği görülmüştür. Bu sayede insan konuşmasına en yakın seslendirme elde edilmiş olacaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

Arık, G., 2011, Görme Engelliler İçin Bilgisayar Kullanımının Etkinleştirilmesi, Erişilebilirlik ve Bir Türkçe Hece Tabanlı Konuşma Sentezleme Sisteminin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara: Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü.

- Aşlıyan, R. Ve Günel, K., 2008, Türkçe Metinler için Hece Tabanlı Konuşma Sentezleme Sistemi, Akademik Bilişim 2008.
- Ayaz, U., 2016, Text-To-Speech Synthesis For Turkish Using A DSP Board, Yüksek Lisans Tezi, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Bicil, Y., 2010, Türkçe Metinden Konuşma Sentezleme, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya: Sakarya Üniversitesi.
- Eker, B., 2002, Turkish Text To Speech System, Yüksek Lisans Tezi, Ankara: Bilkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Erdemir, C., 2010 Türkçe Metin Seslendirme İçin Doğal Konuşma Sentezleme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: İstanbul Üniversitesi.
- Görmez, Z., 2009, Makine Öğrenme Algoritmalarıyla Türkçe Metin Seslendirme Sistemi Yazılımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: Fatih Üniversitesi.
- Güldal, K., 2009, Türkçe Metin Seslendirme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Güner, E., 2013, A Hybrid Statistical/Unit-Selection Text-To-Speech Synthesis System For Morphologically Rich Languages, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: Özyeğin Üniversitesi.
- Karagöz, E. Ve Koruyan, K., 2020, Design of Audio Description System Using Cloud Based Computer Vision, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi, 4 (1), 74-85.
- Karamehmet, T., 2015, Implementation Of Turkish Text To Speech Synthesis, Yüksek Lisans Tezi, Ankara: Atılım Üniversitesi
- Klatt D., 1987, Review of Text-to-Speech Conversion for English, Journal of the Acoustical Society of America, JASA, 82(3), 737-793.
- Kul, S., 2020, Türkçe Ders Anlatan Yapay Zekaya Giden Yolda Doğal Dil İşleme, Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi, 6(2), 43-56.
- Kutlugün, M. A., 2017, Gözetimli Makine Öğrenmesi Yoluyla Türe Göre Metinden Ses Sentezleme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: Sabahattin Zaim Üniversitesi.
- Kutlugün, M. A., ve Şirin, Y., 2018, A Novel Approach Improvement Framework For Text To Speech Synthesis, 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 1-4.
- Li, X., Ma, D., Ve Yin, B., 2021, Advance Research In Agricultural Text-To-Speech: The Word Segmentation Of Analytic Language And The Deep Learning-Based End-To-End System. Computers And Electronics In Agriculture, 180, 105908.
- Otter, D. W., Medina, J. R., Ve Kalita, J. K., 2020, A Survey Of The Usages Of Deep Learning For Natural Language Processing. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 32(2), 604-624.
- Schroeder, M. R., 1972, Computer speech recognition, compression, synthesis, Berlin: Springer, (2), 26-27.
- Sel, İ., 2013, Türkçe Metinler İçin Hece Tabanlı Metinden Konuşma Sentezleme Sistemi, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sel, İ., Hanbay, D. ve Karabatak, M., 2011, Beyin Bilgisayar Arayüzleri İçin Türkçe Metinden Konuşma Sentezleme Sistemi, Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu, Bildiri Kitabı II, 2011 Elazığ, 273-276.
- Şentürk, T., 2010, Türkçe Metin Seslendirme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Şentürk, T. ve Adalı, E., 2016, Türkçe Metin Seslendirme, Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi, 4 (1).
- Tekindal, B. ve Arık, G., 2012, Görme Engelliler için Türkçe Metinden Konuşma Sentezleme Yazılımı Geliştirilmesi, Bilişim Teknolojileri Dergisi, 5 (3), 9-18.
- Tora, H., Uslu, İ. B. Ve Karamehmet, T., 2017, Implementation Of Turkish Text-To-Speech Synthesis On A Voice Synthesizer Card With Prosodic Features, Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi A- Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik, 18 (3), 584-594.
- Uslu, İ. B., 2010, Metinden Konuşma Sentezleme, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Ankara Şubesi Haber.
- Uysal, F., 2017, Eklemeli Sentezleyici Yöntemi Kullanılarak Türkçe Metinden Konuşma Sentezleme, Yüksek Lisans Tezi, Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Uzun, E., 2007, Görme Engelliler İçin Basılı Doküman Yorumlama ve Seslendirme Sisteminin Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon: KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ünalı, İ., 2007, Taşınabilir Cihazlar İçin Türkçe Metinden Konuşma Sentezleme Sistemi, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon: KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Wallace, S. E., Hux, K., Knollman-Porter, K., Brown, J. A., Parisi, E., Ve Cain, R., 2021, Reading Behaviors And Text-To-Speech Technology Perceptions Of People With Aphasia. Assistive Technology, 1-12.
- Yang, L. W. Y., Ng, W. Y., Foo, L. L., Liu, Y., Yan, M., Lei, X., ... Ve Ting, D. S. W., 2021, Deep learning-based natural language processing in ophthalmology: applications, challenges and future directions. Current opinion in ophthalmology, 32(5), 397-405.
- Yapıcı, M. M. , Tekerek, A. Ve Topaloğlu, N., 2019, Literature Review of Deep Learning Research Areas. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD) , 5 (3) , 188-215.
- Yılmaz, A. E., 2009, Türkçe Metinden Konuşma Sentezleme Uygulamaları İçin Bir Veri Sözlük Seti ve Yazılım Çerçevesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24 (4), 735-744.



ŞARJ EDİLEBİLİR PİLLERE GENEL BAKIŞ

Kadir Can SEZER^{1*}, Gültekin BASMACI²

¹ Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Burdur, Türkiye

² Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Burdur, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Şarj Edilebilir, Sekonder Pil, Elektrokimyasal, Li-İyon, Na-İyon.</i>	Günümüzde insansız hava araçları, insansız su altı araçları, robotik ve otonom cihazlar, hibrit ve elektrikli taşıtlar, taşınabilir bilgisayarlar, ileri teknoloji cep telefonları, küçük dijital kameralar, askeri yenilikler ve kablosuz cihazlar oldukça yaygınlaşmıştır. Bu nedenle, bu teçhizatlar için enerji depolaması sorunu oluşmuştur. Günümüzde en verimli piller arasında yer alan lityum iyon piller, piyasada yadsınamayacak kadar geniş bir alana sahiptir. Lityum iyon piller çok büyük bir kapasiteye sahiptir. Bununla birlikte, dünyadaki lityum kaynağının sınırlı olmasından dolayı, lityum iyon piller neredeyse sınırlarına ulaştı ve yüksek bir maliyetle karakterize edildi. Bu da lityum iyon pilleri gibi şarj edilebilir piller olarak adlandırılan bu tür teknolojilerin daha da geliştirilmesini gerektiriyor. Bu makale geçmişten günümüze geliştirilmiş olan sekonder yani şarj edilebilir pilleri incelemek için derlenmiş bir makaledir, bu piller, lityum hava piller, sodyum iyon piller, lityum sülfür piller gibi lityum iyon sonrası piller ve kurşun asit, nikel kadmiyum, nikel çinko, nikel metal hidrit gibi şarj edilebilir pillerdir.

OVERVIEW OF RECHARGEABLE BATTERIES

Keywords	Abstract
<i>Rechargeable, Secondary Battery, Electrochemical, Li-Ion, Na-Ion.</i>	Today, unmanned aerial vehicles, unmanned underwater vehicles, robotic and autonomous devices, hybrid and electric vehicles, portable computers, high-tech mobile phones, small digital cameras, military innovations and cordless devices have become widespread. Therefore, energy storage problem has arisen for these equipment. Lithium ion batteries, which are among the most efficient batteries today, have an undeniable wide area in the market. Lithium ion batteries have an enormous capacity. However, due to the limited supply of lithium in the world, lithium-ion batteries have almost reached their limits and are characterized by a high cost. This requires further development of such technologies called rechargeable batteries, such as lithium-ion batteries. This article is a review article to examine secondary rechargeable batteries developed from the past to the present, such as, lithium air batteries, sodium ion batteries, lithium sulfur batteries such as batteries developed on lithium-ion infrastructure and lead acid, nickel cadmium, nickel zinc, nickel metal hydride types of rechargeable batteries.

Alıntı / Cite

Sezer, K. C., Basmacı, G., (2022). Şarj Edilebilir Piller Genel Bakış, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 297-309.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

K.C. Sezer, 0000-0001-8941-9251
G. Basmacı, 0000-0003-4818-3160

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	02.06.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	19.08.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	04.10.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

* İlgili yazar / Corresponding author: 2030125013@ogr.mehmetakif.edu.tr, +90-506-841-5600

1. Giriş (Introduction)

Yeni sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan gereksinimin artması ve elektrikli ulaşım araçlarının yaygınlaşması elektrokimyasal batarya teknolojisini ön plana getirmiştir (Kocaman, 2019). Hali hazırda kullanılmakta olan fosil yakıtlı taşıtların, elektrik enerjili taşıtlara dönüşmesi, dünya ve hayat standartları açısından çok önemlidir (Etacheri vd., 2011; Demir ve Aküner, 2018; Güneş vd., 2018). Bu alanlardaki devrimci çalışmalar büyük miktarlarda enerji depolama ihtiyacı oluşturmaktadır. Bu depolama birimleri büyük enerji ve büyük güç barındırmaya gereksinmekle beraber, düşük maliyetli ve dayanıklı olmaya da ihtiyaç duymaktadır (Din vd., 2017; Mulder vd., 2013). Ayrıca günümüzde taşınabilir elektronik ve elektrikli cihazlara olan gereksinimlerin yoğunlaşmasıyla beraber yüksek performanslı pillere ihtiyaç oluşmuştur (Moralı ve Erol, 2020).

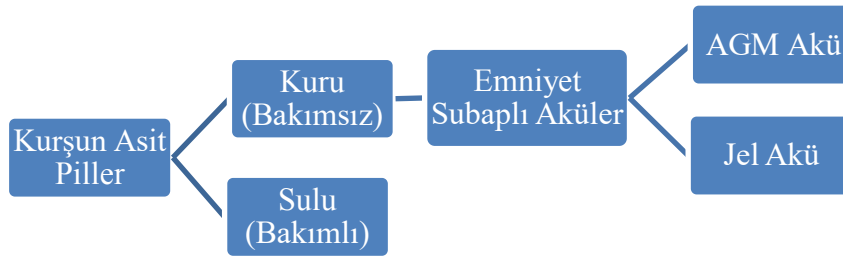
Enerji depolama sistemlerinden olan piller, birincil (şarj edilemeyen) ve ikincil (şarj edilebilen) olarak iki genel tanımda ayrılmaktadır. Kurşun-asit (Pb-asit), nikel-kadmiyum (Ni-Cd), nikel-çinko, nikel-demir, gümüş-kadmiyum, gümüş-çinko, çinko-mangan, nikel-metal hidrit (Ni-MH) ve lityum-iyon (Li-iyon) pilleri ikincil pillerdendir (Zhu vd., 2014). Enerji depolama çalışmalarında yüksek enerji yoğunluğu, uzun kullanım süreleri, hızlı şarj olabilmesi ve hem potansiyel hem sıcaklık bakımından sağlıklı çalışma aralıklarına sahip olması gibi yeteneklerinden dolayı Ni-MH ve Li-iyon bataryaların kullanım oranı yüksektir (Morimoto vd., 2018).

2. Şarj Edilebilir Piller (Rechargeable Batteries)

2.1. Kurşun Asit Piller (Lead Acid Batteries)

Kurşun-asit piller yeniden şarj olabilen piller içinde en yaygın ve en eski çeşittir. Bu piller 1860'da Gaston Plante tarafından keşfedilmiştir (Dell ve Rand, 2001). Elektrokimyasal tabanlı enerji kaynakları arasında öne çıkan temiz ve yenilikçi enerji kaynaklarından biridir. Kabaca bakıldığında kurşun-asit piller birbirine benzeyen ve birden çok hücreden oluşur. Sistem bir hücre anot, diğeri katot olmak üzere ve bu iki hücreyi birbirinden ayıran bir ayırıcıdan oluşmaktadır. Katot hücre çoğunlukla kurşun veya kurşun alaşımlarından oluşurken, anot hücre kurşun oksitten oluşmaktadır. Elektrolite bakacak olursak %30-40 kütle oranında sülfürik asit çözeltisi pile katılmaktadır.

Kurşun asit piller temelde sulu (bakımlı) ve kuru (bakımsız) olarak iki ana gruba ayrılırlar. Kuru pillerin bir diğer adlandırması da emniyet subaplı akülerdir. Emniyet subaplı aküler imalatı esnasında tercih edilen hammaddeye göre iki alt gruba ayrılmaktadır. Bu iki alt grup, Jel ve Emici Cam Mikro-Fiber (Absorbed Glass Mat) AGM akülerdir (Gençten, 2013). Şekil 1.'de kurşun-asit pillerin gruplandırması gösterilmiştir.



Şekil 1. Kurşun Asit Pillerin Gruplandırması (Classification of Lead Acid Batteries)

Sulu tip asit pilleri sülfürik asit (elektrolit) karışımı içine anot ve katot plakalarının daldırılması ile oluşturulur. Bu tip kurşun-asit pillerde aşırı yüklenme durumunda anot ve katot plakalarda oksijen ve hidrojen oluşumu gözlenir. Bunlar direkt olarak sistemden uzaklaştırıldığında elektrolitte azalma gerçekleşir ve plakaların elektrolit karışımı ile temas alanı düşer. Bu da şarj süresince yüksek ısı oluşmasına neden olur ve pil verimliliğini olumsuz etkiler. Bu şartlarda sisteme sürekli su veya elektrolit eklemek gerekmektedir. Bu gerekliliklerden dolayı sulu tip piller bakım gerektiren aküler olarak bilinir ve zamanla kullanılabilirliği büyük oranda azalmıştır (Rand vd., 2004).

Emniyet subaplı akülerde, (Valve-Regulated Lead-Acid) VRLA sulu tip akülerden farklı olarak tek yönlü bir subap oluşan oksijen ve hidrojenin sistem içerisinde kalmasını sağlar. Akü kapalı bir sistem olduğu için yüklenme anında pozitif plakada açığa çıkan oksijen sistemden atılamaz ve bu oksijen negatif plakaya yönlendirilerek plakada moleküler oksijen iyonuna indirgenir. İndirgenen iyonlar negatif plaka üzerinde elektrolitten açığa çıkan proton ile etkileşime geçerek su molekülünü meydana getirirler. Bu sayede pilde su eksilmesi yaşanmadığı için bakımlı tip akülerde olduğu gibi sisteme su ve asit yüklemesi yapmaya gerek kalmamaktadır. Bu nedenle VRLA aküler bakımsız veya kuru tip aküler şeklinde de isimlendirilir (Gençten, 2013).

VRLA aküler pozitif ve negatif plakalar arasındaki elektroliti sabitleme şekline göre ikiye ayrılır:

- Jel Akü: Sülfürik asit, çok dar aralıklı, büyük yüzey alanlı silika ile karıştırılır. Bekletilerek jölemsi kıvamda yapışkan bir karışım halini alır. Oksijen aktarımı, kısmi kuruma ve daralmanın getirisi olarak pil kullanımının erken safhalarında gerçekleşen jeldeki çatlaklar vasıtasıyla meydana gelir.
- AGM Akü: AGM, bu aküdeki ayırıcının yapıldığı Emici Cam Mikro-Fiber'in (Absorbed Glass Mat) kısaltmasıdır. AGM genellikle emme kapasitesinin % 90 ila 95'i oranında asit emdirilir. Asit emdirilmeyen gözenekler, oksijenin negatif plakaya aktarımını sağlamak üzere bulunur. AGM ayırıcılar, hem şarj hem de deşarj anında iyonların hızlı aktarımına izin vererek iç direnci minimuma indirmek için plakalarla en yakın konumda olmalıdırlar. Yeterli teması sağlamak için, plaka grubu akü kutusuna sık bir biçimde oturtulmak suretiyle sıkıştırılır (Rand vd., 2004).

Jel ve AGM VRLA tip akülerin sulu tip akülere göre avantaj ve dezavantajları Tablo 1'de gösterilmiştir.

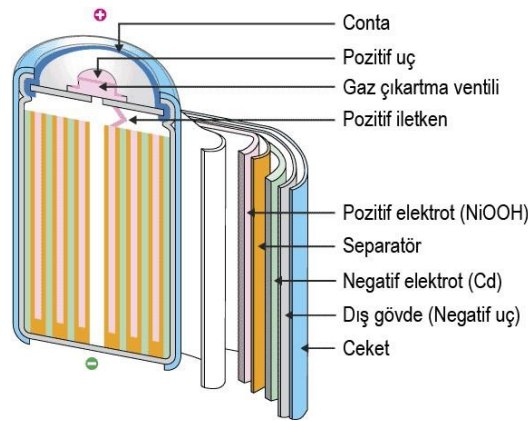
Tablo 1. Jel ve AGM Tip Akülerin Sulu Tip Akülere Göre Avantaj ve Dezavantajları
(Advantages and Disadvantages of Gel and AGM Batteries Compared to Water Type Batteries)

Madde	Avantajlar	Dezavantajlar
1	Asit ve su eklemek gerekmemesi	Dikkatli şarj edilmesi gerekmektedir
2	İhmal edilebilir asit dumanları	Sıcaklık dengelemesi daha önemli (Özellikle AGM tipi akülerde)
3	Taşıma kolaylığı	Pil kapasitesini tamamen doldurmak için yüksek voltajlarla şarj edilme gereksinimi
4	Özel havalandırma gerektirmemesi	Çevrim sayısının düşük olması
5	İhmal edilebilir asit katmanlaşması (Jel tipi)	Bağlı yoğunluk ölçülemiyor
6	Oda sıcaklığında daha düzenli çalışma	Maksimum 2 yıllık raf ömrü
7	Yüksek verimde deşarj kapasitesi (Akü deşarj olduktan sonra içeriğinde artık gerilim barındırmaması demektir)	-

2.2. Nikel Kadmiyum Piller (Nickel Cadmium Batteries)

İlk keşfedilen sekonder pil teknolojilerinden biridir. Elektrik yükü ile yüklükten artı kutupta nikel hidroksit vardır, eksi kutupta ise sadece kadmiyumdan mevcuttur. Potasyum hidroksit elektrolit çözeltisidir. Ni-Cd bataryaların, kendinden sonra keşfedilen sekonder pil türlerine göre öncelikli bazı avantajları çok güvenilir olmaları, hızlı şarjda güvenli olmaları, daha fazla şarj edilebilmeleri ve sıfırın altındaki sıcaklıklarda dahi sorunsuzca kullanılabilir olmaları. Bu avantajlarından dolayı Ni-Cd bataryalar özellikle taşınabilir kablosuz enerji depolama cihazlarında kullanılmaktadır (Hung vd., 2018).

Ancak yapısındaki büyük miktarlardaki kadmiyum elementinden dolayı yeni uygulamaların çoğunda nikel kadmiyum bataryalar yerine metal hidrür bataryalar kullanılmaktadır. Kullanımının azalmasına neden olan başlıca dezavantajlarından bir diğeri de birincil alkali mangan ve lityum bataryalarına kıyasla düşük gerilim üretmeleridir (Yu vd., 2000). Nikel kadmiyum pillerin kullanımında karşılaşılan avantaj ve dezavantajların geneli Tablo 2'de görülebilir.



Şekil 2. Nikel Kadmiyum Pil Kesit Görüntüsü (Section View of Nickel Cadmium Battery) (<https://tap.org.tr>)

Nikel kadmiyum bataryalara özgü bir sorun olan klasik hafıza etkeni de bu pillerin kullanımındaki sorunlardan bir diğeridir. Hafıza etkeni kabaca pilin deşarj olmuş hali ile kalarak yeniden şarj edilebilme yetisini kaybetmesi demektir. Bu soruna pildeki eksi kutbu oluşturan kadmiyum elementi neden olmaktadır. Olumsuz bir etmen olan hafıza etkeni bataryanın doğru kullanılmaması halinde kapasitede azalmaya neden olabilir. Bu oluşumun nedeni bataryanın uzun süreler boyunca düşük akımla şarj olması ya da bataryanın deşarj edilirken kapasitesinin büyük kısmının boşaltılmamasından dolayı eksi kutup olan kadmiyum çevresinde kristalleşmelerin meydana gelmesidir. Kristalleşme arttıkça eksi kutbun çevresi sarılır ve batarya kapasitesini ve gerilimini sadece çok kısa dakikalar boyunca üretebilir. Kristalleşme sorununun önüne geçmek için şarj edilmiş haldeki bataryaya şarj yüklemesi yapılmaması ayrıca teçhizat kullanılamaz hale gelinceye kadar bataryanın boşaltılması gerekmektedir. Günümüzde kullanmakta olduğumuz şarj aletlerinin pildeki şarj seviyesini ve şarj edilebilir kapasitesini ölçebilmesi sebebiyle hafıza sorunu, bu yeni şarj cihazlarıyla büyük oranda engellenebilmektedir (Özdoğan, 2010).

Tablo 2. Ni-Cd Bataryaların Kullanımındaki Avantaj ve Dezavantajlar
(Advantages and Disadvantages of Using Ni-Cd Batteries) (Uz, 2019)

Madde	Avantajları	Dezavantajları
1	İç gerilimi yüksek olmadığı için yüksek akım elde edilebilmektedir.	Spesifik hacimleri küçüktür.
2	Kendi kendine deşarj olma özelliği diğer pillere göre daha düşüktür.	Klasik hafıza durumunda ani gerilim dalgalanmalarında problemler yaratabilmektedir.
3	Soğuk ortamlarda verimli çalışabilmektedir.	İçerdiği toksik maddeler nedeniyle çevre dostu bir yapıya sahip değildir.

2.3. Nikel Çinko Piller (Nickel Zinc Batteries)

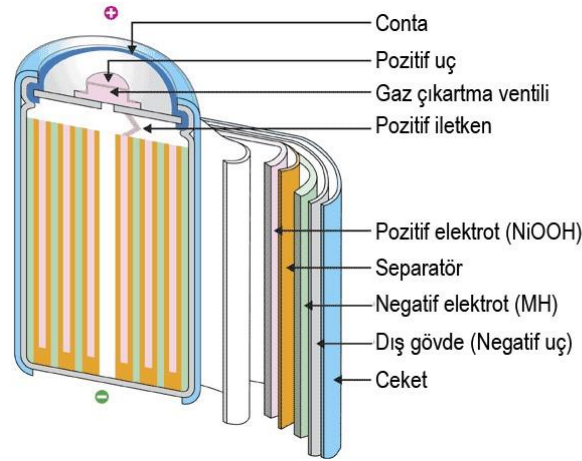
Şarj edilebilen Ni-Zn piller 1920'lerde keşfedilmiştir, ancak Ni-Zn piller yalnızca 2008 yılında tüketici pazarı için AA boyutunda satışa sunulabilmiştir (<https://reactual.com>). Ni-Zn pil pozitif ucun çinkodan, negatif ucun nikel oksitten oluştuğu elektrokimyasal bir enerji depolama kaynağıdır. Potasyum hidroksit, iletken materyalin verimini yükseltmek için lityum hidroksitin eklendiği bu tip hücrelerde potasyum hidroksit bir elektrolit olarak çalışmaktadır (<https://technoluxpro.com>).

Yakın dönemde yapılan bazı araştırmalarda, yüksek güç kapasitesi ayrıca yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasından dolayı hibrit taşıtlarda Ni-Zn bataryaların kullanılabilirliği şansı doğmuştur. Ayrıca pilin -39 ile +81°C gibi oldukça geniş bir çalışma sıcaklığı aralığına sahip oluşu büyük bir avantajdır. Enerji yoğunluğu 70 Wh/kg ve güç yoğunluğu 150 W/kg olmasına rağmen bu pillerdeki başlıca sorun dendrit uzantıları görülmesi sebebiyle pilin ömrünün düşmesidir. Pil şarj durumundayken çinko anotta dendrit oluşumları gözlenmektedir bu da pilin çevrim sayısını düşürdüğü için, bu pillerin yaygınlaşmasının önüne geçmiştir (Aras, 2009).

Bununla birlikte, Ni-Zn pillerin uzun bir ömrü yoktur yaklaşık 30-50 şarjdan sonra, kolayca tükenme eğilimindedirler. Ni-Zn piller ayrıca kimyaları için optimize edilmiş özel bir şarj cihazı gerektirir. Genel olarak Ni-Zn piller, yüksek güçlü, yüksek voltajlı bir pilin gerekli olduğu ve uzun ömürlülüğün gerekli olmadığı durumlarda iyi bir seçimdir (<https://technoluxpro.com>).

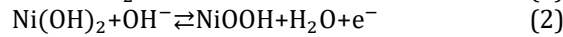
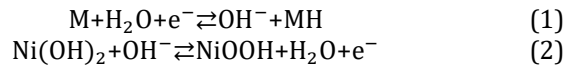
2.4. Nikel-Metal Hidrit Piller (Nickel-Metal Hydride Batteries)

Nikel-metal hidrit (Ni-MH) piller günümüzde tüketici elektroniği ve elektrikli araçlar alanında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır ve Ni-Cd ve Li-ion pillere göre çeşitli avantajlara sahiptir. Ni-MH piller yüksek enerji depolama yoğunluğuna sahiptir ve yüksek akım yoğunluklarında ve düşük sıcaklıklarda çalıştırılabilir. Kimyasal elementleri toksik değildir (Ledovskikh vd., 2003). Ni-MH piller, özellikle enerji yoğunluğu ve yaşam döngüsü açısından diğer ikincil pil türlerine göre birçok avantaja sahiptir. Bununla birlikte, NiMH pilinin maliyeti çok yüksektir (yaklaşık 250 \$ / kWh). Bu nedenle uygulamalarda elektrikli ve hibrit arabalar için güç kaynağı olarak kullanımları sınırlanmaktadır (Ying vd., 2006).



Şekil 3. Ni-MH Pili Kesit Görüntüsü (Section View of Ni-MH Battery) (<https://tap.org.tr>)

Temel Ni-MH pil elektrokimyası aşağıdaki reaksiyonlarda gösterilmiştir:



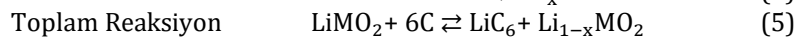
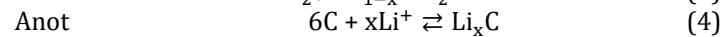
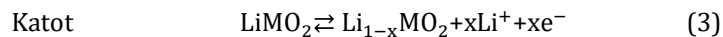
Negatif elektrotta (anot) meydana gelen reaksiyon Denklem (1)'de açıklanmaktadır. M, hidrojeni tersine çevrilebilir şekilde depolayabilen bir metal hidrit (MH) alaşımıdır ve MH, karşılık gelen hidridlenmiş metaldir. Şekil 3'te Ni-MH pile kesit görüntüsü ve pile ait elemanlar gösterilmiştir. Şarj sırasında, eklenen voltaj su molekülünü bir proton ve bir hidroksit iyonuna böler. Potansiyel ve difüzyon farkı tarafından yönlendirilen protonlar, elektrolitten MH alaşım partiküllerinin yüzeyine ve daha sonra alaşım yığına aktarılır. Deşarj sırasında protonlar ters yönde hareket ederler. Denklem (2), pozitif elektrottaki (katot) reaksiyonu temsil eder. Şarj sırasında protonlar $Ni(OH)_2$ 'den ayrılır, daha sonra katot yüzeyine hareket eder ve son olarak elektrolit içindeki hidroksit iyonlarıyla yeniden birleşir (Yan vd., 2017).

2.5. Lityum İyon Piller (Lithium Ion Batteries)

2.5.1. Lityum İyon Pillerin Çalışma Prensibi (Working Principle of Lithium Ion Batteries)

Lityum iyon bataryalar pozitif, negatif elektrot ve elektrolit olarak üç ana yapıdan oluşmaktadır. Hem anot hem de katot lityum iyonlarının geçişlerini engellemeyen mikro gözenekli polimer membran olan bir ayırıcı ile ayrılmaktadır. Katot genellikle katmanlı ya da oluklu yapıya sahip metal oksitlerden meydana gelir. Anot da katmanlı yapılardan meydana gelir. Anot ve katotun bu şekilsel yapıları sayesinde bataryanın şarj ve deşarj olduğu anlarda lityum iyonları anot ve katot arasında iki yönlü olarak hareket edebilmektedir. İki yönlü olarak gerçekleşen bu hareket topotaktik tepkimesi olarak adlandırılır. Topotaktik olarak adlandırılan bu tepkimede aktif maddeler pozitif ve negatif elektrotlar olarak lityum için bir nevi konak görevi görür lityum ise anot ve katot arasında hareket etmektedir (Polat ve Keleş, 2013).

Şarj esnasında lityum iyonları pozitif elektrottan koparak elektrolit vasıtasıyla ayırıcıdan geçer ve negatif elektrot ile bileşik meydana getirirler. Buna benzeyen bir biçimde pozitif elektrottan kopan elektronlar dış bir devre yoluyla negatif elektrot tarafından yakalanırlar (Miller, 2015). Bu reaksiyonların tersinir olmasından dolayı, sistem deşarj edilebilir olarak geçmektedir (Nitta vd., 2015). Şarj ve deşarj devam ederken elektrotlardaki potansiyel dalgalanmaları alt seviyelerde kalmalıdır. Bahsedilen kimyasal süreçler boyunca oluşan redoks reaksiyonları Denklem (3), (4) ve (5)'te görülebilir (Scrosati ve Garche, 2010).



2.5.2. Lityum İyon Pillerin Geleceği (The Future of Lithium Ion Batteries)

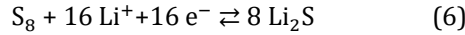
Lityum iyon bataryalar yakın gelecekte de elektrikli gereçler, (bilgisayar, ev aletleri, endüstriyel ürünler, telefonlar) elektrikli taşıtlar, insansız hava araçları, robotik teknolojiler gibi birçok alanda en yoğun kullanılan

enerji depolama sistemi olmaya devam edecektir. Fakat araştırmacılar, maliyet azaltmak, güvenli ve daha verimli elektrokimyasal pil gelişmeleri için yeni nesil lityum iyon sonrası batarya araştırmaları yapmaktadırlar (Yu vd., 2018).

Dünyada elektrikli taşıt satışlarının artışı, bundan 5 yıl önce öngörülenden yavaş artmıştır ki bu durum, elektrokimyasal pil sanayisinin yüz yüze kaldığı zorluğu göstermektedir: alıcılar, menzile (ve bağlantılı olarak enerji konsantrasyonuna) ve elektrikli taşıtlara ödedikleri ücretlere oldukça dikkat etmektedir. Tersinir bir pilin enerji konsantrasyonu öncelikli olarak negatif ve pozitif plakaların özel kapasiteleri ve çalışma potansiyelleri üzerinden belirlendiğinden, aktif materyallerin yakın tarihteki araştırmaların temel konusu olmasına neden olmuştur (Choi ve Aurbach, 2016).

2.5.3. Lityum Kükürt Piller (Lithium Sulfur Batteries)

1675 mAh/g kadar yüksek teorik gravimetrik kabiliyette olması, uygun fiyatı ve değerlendirilebilirliğinin kolaylığı nedenleriyle kükürdün bataryalarda tercih edilme oranı artmaktadır (Hatipoğlu, 2019). Li-İyon bataryaların yatırım giderinin % 40'ının katot materyalinin yüksek maliyetlerinden olduğunu değerlendirerek, katot madde olarak hem ucuz hem de yüksek gravimetrik yetenekteki sülfürün tercih edilmesi, giderleri düşürmede etkili bir yöntem olabilir. Lityum sülfür piller, şu an için ticari bir değer olmaktan ciddi anlamda uzaktadır. Sülfür katodu, çok kademeli komplike bir dönüşüm tepkimesi ile kullanılabilir duruma gelirken, anot genellikle şarj ve deşarj anlarında yüzeyinin kaplanmasına ve soyulmasına maruz kalan Li metalidir. Geri çevrilebilir sülfür lithasyonu alttaki Denklem (6)'da ki eşitlik ile meydana gelir ve potansiyeli hemen hemen 2,2 V (Li/Li⁺)'dur (Middlemiss ve Holland, 2018).



Geçmişten günümüze deneyler lithasyonu anında meydana gelen %80 hacimsel genişlemesi buna bağlı elektrik iletkenliğindeki azalışa ve komplike tepkimeleri sebebiyle pozitif elektrot olarak kullanılan sülfüre odaklanmıştır. Lithasyonu anında, orta ve yüksek çözünürlüğe sahip polisülfid, katot ve anot arasında hareket edebilir, bu nedenle negatif elektrotta aktif materyal eksilmesi oluşur ve pozitif elektrotun etkisizleşmesine yol açar. Bu etkilerin giderilmesi ile ilgili detaylı deneyler yapılmıştır (Wang vd., 2013).

Sülfürün pozitif elektrot olarak kullanılmasında ciddi gelişmeler yakalanmış olsa da, lityum-sülfür bataryasının çevrim sayısının negatif olarak kullanılan lityumdan doğan kullanım süresi ile kısıtlanması muhtemeldir. Yeni araştırmaların çoğunluğunda pozitif elektrot olan sülfürün gelişmesi ön planda olsa da, negatif elektrotun stabilitesinin geliştirilmesi ile ilgili araştırmalar da artış göstermektedir. Negatif elektrotun kararlılığı ile ilgili başka bir konu, negatif elektrota yönelen polisülfitlerin negatif elektrot üzerinde korozif etki yaratmasıdır. Bilhassa yüksek akımın yoğun olduğu anlarda kayda değer bir sorun olan Lityum elektrotta dendrit yapılarının oluşumu ve gelişimi gözlenebilir. Bu, toz lityum meydana gelmesini sağlar, toz haldeki bu lityum ve dendrit oluşumundan dolayı büyüyen yüzey alanı sebebiyle fazlaca polarizasyon ve elektrolit harcanmasına sebebiyet verir. Ayrıca, bu olumsuzluklar sistemde kısa devre oluşabilmesi gibi emniyet açısından sakıncalar ortaya çıkarmaktadır. Dendrit oluşumunu azaltmak için katı elektrolit ara yüzey plakasının meydana getirilmesiyle negatif elektrot dengesini yükseltebilmek için elektrolite ek maddeler katılmıştır (Cheng vd., 2018). Eter bazlı elektrolitlerde LiNO₃'ün dendrit oluşumlarını azaltmada yararlı olduğu verilmiştir, fakat büyük oranda sülfür iyonu hareketlenmesinde zararlı tepkimelerin önüne geçmek için yetersiz kalmaktadır ayrıca, negatif elektrotta 1,6 V değerinin altında bozunmaya uğrayabilir (Cheng vd., 2017).

2.5.4. Sodyum İyon Piller (Sodium Ion Batteries)

Sodyum iyon (Na-iyon) bataryalar, Lityum iyon pillere daha düşük maliyetli, daha emniyetli ve daha uzun yıllar kullanımına devam edilebilir bir seçenek olarak görülmektedir. Dünya'da lityum cevherinin yaklaşık 1000 katı sodyum cevheri var olduğundan ayrıca sodyumu deniz suyu gibi tuzlu su olarak adlandırdığımız sulardan da basitçe açığa çıkarabildiğimizden, sodyum ile lityum sürdürülebilirlik açısından kıyaslandığında sodyum tercih edilmektedir (Slater vd., 2012). Ek olarak da, lityum iyon bataryalarda negatif elektrotta elektron toplayıcısı olarak çalışan bakırın yerine daha düşük maliyetli alüminyum tercih edilebilmektedir (Yabuuchi vd., 2012). Alüminyum kullanımının nedeni, sodyum ve alüminyum arasında alaşım gerçekleştirmek üzere herhangi bir tepkime gerçekleşmemesidir. Na-iyon bataryalar üzerinde ısı firarlarının daha nadir görülmesinden dolayı yapısal olarak bakıldığında emniyet olarak daha üstün oldukları kabul edilmektedir (Xia ve Dahn, 2012). Ayrıca, sodyum iyon bataryaların enerjisi boşalmış haldeyken (%0 şarj) şarj edilebilirler, diğer piller tamamen boşaldığında kapasitelerini kaybetmeye başlarlar örneğın nikel kadmiyum pillerdeki hafıza etkisi bu duruma örnektir. Enerjisini tamamen boşaltabilme özelliği sayesinde sodyum iyon bataryaların transfer işlemleri daha güvenli olmaktadır. Bir diğer kayda değer avantaj, iki tek değerlikli iyon meydana getiren alkali metallerin

birbirine yakın kimyasal özelliklere sahip olmasından dolayı, önümüzdeki zamanlarda Na-iyon batarya üretiminin Li-iyon batarya alt yapısını kullanarak daha hızlı ve kolay bir şekilde yapılabileceği ön görülmektedir. Fakat, lityum iyon bataryalar yerine ek bir seçenek olarak kullanılması düşünülen Na-iyon bataryaların araştırma geliştirme çalışmalarında bir takım sorunlarla karşılaşmıştır (Tablo 3) (Deng vd., 2017).

Tablo 3. Na-İyon Bataryalardaki Sorunlar (Issues of Na-Ion Batteries) (Deng vd., 2017)

Katot
Kararlılık (Doğrudan H ₂ O / CO ₂ ile reaksiyona girer)
Tatmin etmeyen elektrokimyasal performans (düşük spesifik kapasite, düşük çevrim sayısı)
Düşük sodyum içeriği (Na _{0.67} Ni _{0.33} Mn _{0.67} O ₂ , Na _{0.67} Cu _{0.14} Mn _{0.86} O ₂ , P2-tipi katmanlı metal oksitler gibi)
Uygun parçacık boyutu dağılımı ve yüzey alanı
Anot
Düşük ilk kulombik verimlilik
Tatmin etmeyen elektrokimyasal performans (düşük spesifik kapasite, düşük çevrim sayısı)
Kararlı katı elektrolit ara yüz katmanı gerektirir
Uygun parçacık boyutu dağılımı ve yüzey alanı
Elektrolit (Sulu Sistem)
Düşük enerji yoğunluğu
Düşük çalışma potansiyeli
Elektrolit (Kuru Sistem)
Güvenlik sorunları
Yüksek maliyet
Ayırıcı ile uyumluluk

Tablo 3'te de görülebileceği gibi sodyum iyon pillerin kullanılabilir hale gelmesi için anot ve katot geliştirilmesine ek olarak elektrolit üzerine de çalışmalar yapılması gerekmektedir (Hatipoğlu, 2019).

Bir Na-İyon bataryada, negatif elektrot çoğunlukla sertliği yüksek bir karbondan imal edilir, bu sert karbon için grafit seçilemez çünkü grafitte karbon plakalarının birbirine uzaklığı, Na⁺ iyonlarının interkalasyonu için yeterli bir mesafe sağlamamaktadır. Lityum iyon bataryalardaki gibi, sodyum iyon bataryalarda da katı elektrolitlerin elektrokimyasal kapasitesi büyük oranda sıvı elektrolitlerin elektrokimyasal seviyesinin altında kalmaktadır, bu sebeple araştırmalara konu olan elektrolitler genellikle organik çözücüler ya da iyonik sıvı karışımlarıdır. Beklentilerin en yoğunlaştığı iki grup olan ve en dikkat çekici ve en çok gelişmenin meydana geldiği polianyonik malzemeler ve tabakalı geçiş metal oksitler ile oldukça fazla olası Na-İyon negatif elektrot materyal çeşitleri incelenmiştir. Polianyonik bileşiklerin yapısal sağlamlığı, istikrarlı bir yapıda oldukları ve sodyum iyonlarının iletimini kolaylaştıran kanal yapıları olduğu anlamına gelir. Katmanlı NaT_MO₂ (T_M=Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni) metal oksitlerin sentezinin görece basit olduğu, ek olarak yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek voltaj sağlayabildiği görülmüştür (Yabuuchi vd., 2014).

2.5.5. Metal Hava Pilleri (Metal Air Batteries)

Metal-hava hücreleri, negatif elektrot malzemesi için havadan oksijen çekmesi sebebiyle spesifik enerjide kayda değer bir yükseliş vaat etmektedir. Lityum hava bataryaları, en iyi tersinir özelliğe sahiptir ama çevrim sayısının azlığı, verimsizliği ve düşük hızda çalışabilme özelliğine sahiptir. Geri dönüşümlü lityum hava bataryasının çalışma sistemi Denklem (7)'deki gibidir ve elektriksel potansiyeli takriben 2,91 V (Li/Li⁺)'dır (Rahman vd., 2013):



Lityum hava bataryalarında lityum eksi elektrotu, karbon bir hava pozitif elektrot ve susuz elektrolit ile ıslatılmış cam mikrofiber bir ayırıcıdan meydana gelir. Aktif katot materyali havadan çekilen O₂'dir ve karbon sadece O₂'nin katalitik indirgenmesi ve deşarj ürünlerinin birikmesi maksadıyla bir hacim olarak çalışır. Deşarj işlemlerinde, Li⁺ iyonları dış devreden gelen elektronlarla ve havadan çekilen O₂ ile birleşerek poroz O₂ elektrodunda Li₂O₂ oluştururlar (Mirzaeian ve Hall, 2009). Şarj sırasında ise, deşarj sırasında oluşan bu Li₂O₂ bileşeni Li ve O₂ olarak ayrışır (Algül, 2015).

Hem anotta hem de katotta dengede bir elektrolitin tercihi ve en gelecek vadede seçeneklerden biri olan iyonik sıvılar, öncelikli araştırılma gereksinimindedir. Sistemde biriken, elektrokimyasal açıdan yalıtkan Li₂O₂'de kapasitenin üst sınırını düşürecek için geliştirilerek aşılmalıdır. Karbon karası çoğunlukla sistemde hava elektrodu olarak görev yapar ve çevrim ömrünü, başlangıçtaki kapasitenin % 90'ına çeker. Katot çözücünün ve tasarımın, başlangıç kapasitesi ve çevrim ömrü açısından da önem arz ettiğini görülmüştür (Ma vd., 2015).

3. Şarj Edilebilir Pillerin Kullanım Alanları (Usage Areas of Rechargeable Batteries)

Günümüzde insansız hava araçları, insansız su altı araçları, robotik ve otonom cihazlar, hibrit ve elektrikli taşıtlar, taşınabilir bilgisayarlar, ileri teknoloji cep telefonları, küçük dijital kameralar, askeri yenilikler ve kablosuz cihazlar oldukça yaygınlaşmıştır. Bu nedenle, bu teçhizatlar için enerji depolaması sorunu oluşmuştur ve bu sorunun çözümü için şarj edilebilir pillerden faydalanılmıştır.

3.1. Kurşun Asit Pillerin Kullanım Alanları (Usage Areas of Lead Acid Batteries)

3.1.1. Otomobil Aküleri (Accumulators)

Otomobil üretim endüstrisi yan kollarından olan aküler; elektrokimyasal olarak enerji sağlayan tersinir bir sistemdir. Akülerin çok farklı çeşitleri olmakla birlikte en yaygın kurşun-asit aküdür. Kurşun asit akü 1956 yılına gelindiğinde Gaston Plante isimli mucit tarafından ilk defa kullanılabilir olarak geliştirilmiş ve bu gelişmenin ardından ticari olarak yaygınlaşmıştır (Demirci vd., 2019).

Deniz araçları, otobüs, kamyon, iş makineleri, jeneratörler, askeri araçlar vb. taşıtlarda kullanılmak üzere 12 ve 6 volt üretilen kurşun asit pillere verilen genel isim otomobil aküsüdür. Ticari anlamda en geniş pazara sahip akü çeşididir (Özermiş, 2010).

3.1.2. Sabit Tesis Aküler (Stationary Batteries)

Endüstriyel tipteki akülerdir. Sabit tesis aküler bakımsız tipteki kurşun asit pillerdendir, 25 amper 5000 amper aralığında ve 2 voltluk hücre yapıları halinde OpzS (tüplü), OGI (sıvama) tip üretilerek ihtiyaç duyulan gerilim değerine göre birleştirilmektedir. 12 ve 6 volt değerlerinde kalıp yapılarında 300 Ah' e kadar üretilmektedir. Güneş pilleri, rüzgar türbinleri (Başaran vd., 2011), hastane, haberleşme, kontrol sistemleri, güç istasyonları, pompa ve sulama merkezleri, güvenlik aydınlatmaları gibi sürekli enerjiye ihtiyaç duyan yerlerde kullanılmaktadır (Özermiş, 2010).

Bu aküler aldığı isimden de anlaşılacağı gibi, hareketsiz/sabit sistemlerde kullanılmak üzere üretilmektedir. Basitçe temelde kurşun asit aküler olarak adlandırılırsalar da, fiziksel yapılarından ve içyapılarından kaynaklanan farklılıklarla birçok çeşide sahiptir. Bakımsız olarak adlandırılan tipi en yaygın kullanılanıdır. Fiziki olarak küçük kapasite olarak düşük türleri var olduğu gibi, çalışma yapısı olarak tamamen aynı prensibe sahip büyük kapasite ihtiyaçlarını da karşılayacak şekilde üretilmektedir. Bakımsız valf ayarlı tipin kullanımı, hava temassız kapalı koşullar için çok önemlidir. Bu şekilde normal şartlarda aküden gaz çıkışı yada sızıntısı beklenmemektedir (Özermiş, 2010).

3.1.3. Çekici Aküler (Traction Batteries)

Tüplü pozitif plakalı (PzS) üretilen çekici olarak adlandırılan yüksek güç verebilen akülerdir. Materyallerin kaldırılması ve taşınmasında, ambalaj stantları ve yükseltmelerinde, elektrikli araçlarda, robotik taşıtlarda ve bazı spesifik hareket yapılarında kullanılabilirler. Yüksek verimli çevrim kapasitesi ve marş kapasitesi yüksek olan bu akülerin forklifte tercih edilen çeşidine ek olarak, alevlenmez kutu kapalı olarak özel üretilen dizel lokomotiflerin ve vagonların aydınlatmasında yararlanılan tipleri de mevcuttur (Özermiş, 2010).

3.2. Nikel Kadmiyum Pillerin Kullanım Alanları (Usage Areas of Nickel Cadmium Batteries)

3.2.1. Hibrit ve Elektrikli Taşıtlarda (Hybrid and Electric Vehicles)

Nikel kadmiyum piller, elektrikli taşıtlar için şarj durumu, akım ve sıcaklık gibi bazı özellikleri bakımından çeşitli ortam koşullarında incelenmiştir. Bu pillerin enerji yoğunluğu ve güç kapasitesi oldukça yüksektir ve bu sebeple uygun bir pil olarak kullanılabilir (Omar vd., 2014). Elektrikli bir araçta performansın üst seviyelerde tutulabilmesi içinde geliştirilen nikel kadmiyum piller mevcuttur (Jeyaseelan vd., 2020).

Fransız Saft firması da, uzun yıllardır elektrikli taşıtlarla ilgilenmektedir ayrıca hibrit otobüsler için bazı çözümlerin denemelerini gerçekleştirdi. Hibrit otobüslerdeki ilk denemeler, çelik konteynerlerde sinterlenmiş pozitif ve negatif elektrotlu hava soğutmalı nikel kadmiyum pilleri kullanımıydı. Sonrasında Saft firması, hava soğutmalı plastik kaplı negatif elektrotta sahip NiCd piller geliştirdi. Bu çözüm, pillerin hafiflemesine ve çevrim kapasitelerinde çok büyük artışa sahip olmalarını sağlamıştır. Bu yenilikler hibrit otobüsler için NiCd bataryaların kullanımının önünü açacaktır (Disosway, 1998).

3.2.2. Uçaklarda (Airplanes)

Nikel kadmiyum pilin, şarj hızı, raf ömrü, boşaltma hızı, maliyeti, ağırlığı, bakımı, hacmi gibi özelliklerinden dolayı, ticari ve kurumsal uçaklarda kullanımı görülebilmektedir. Genellikle hava taşıtlarında havalandırma tipi bataryalar kullanılmaktadır ve 12-24 volt değerini elde etmek için seri olarak birbirine bağlanır. Uçaklarda ayrıca, bir arıza gözlemlendiğinde otomatik olarak kapanan bataryanın durumunu izleyen bir arıza koruma sistemi vardır (Jeyaseelan vd., 2020).

3.2.3. Kablosuz Cihazlarda (Wireless Devices)

Elektrikli diş fırçaları, traş makineleri, radyo kontrollü oyuncaklar, telsizler, cep telefonları gibi birçok kablosuz cihazın enerji gereksinimini karşılamada nikel kadmiyum piller kullanılmaktadır. Bu cihazlarda nikel kadmiyum piller, yüksek sıcaklıklarda sorunsuz çalışabilmesi, taşınabilirliğinin olması (küçük boyutlu), yüksek çevrim sayısına sahip oluşu (1000 çevrime kadar), çoklu olarak bağlanarak düşük dirençlerle yüksek akım sağlayabilmeleri gibi özelliklerinden dolayı kullanılabilir. Hafıza etkisine sahip olması nedeniyle kısa devrelere yol açabilmesi, içeriğindeki kadmiyumun toksik bir madde olması, tamamen boşaltılmadan şarj edildiğinde kapasitesinin düşmesi gibi nedenlerden dolayı kullanım oranı azalmıştır (Jeyaseelan vd., 2020).

3.3. Nikel-Metal Hidrit Pillerin Kullanım Alanları (Usage Areas of Nickel-Metal Hydride Batteries)

3.3.1. Hibrit ve Elektrikli Taşıtlarda (Hybrid and Electric Vehicles)

Elektrikli araçlar için sağlıklı bir Ni-MH pilin temelde sahip olması gereken özellikler, enerji yoğunluğunun yüksek olması, yanlış kullanımları tolere edebilmesi, geniş bir çalışma sıcaklığı aralığına sahip olması, hızlı şarj edilebilmesi ve hidrojeni katı hidrit formda depolayabilmesi şeklinde sıralanabilir (Arya ve Verma, 2020).

Elektrikli taşıtların ve benzinli taşıtların sunmuş olduğu sürüş deneyimleri birbirine çok yakın olmasına karşın, elektrikli taşıtların yatırım maliyeti benzinli taşıtlardan çok daha yüksektir. Konvansiyonel kurşun asit pillerle birlikte ayrıca, birçok otomobil şirketi nikel-metal hidrit piller kullanarak elektrikli taşıtlar geliştirmiştir. Binek araçlarda, pilin yerleştirileceği alanın kısıtlı olması sebebiyle, her şarj başına 200 km'den fazla sürüş menzili yalnızca Li-iyon ve Ni-MH batarya sistemleri ile mümkündür. Sadece elektrik enerjisi kullanan taşıtlar için batarya sistemlerindeki zorunlu faktör, akü hacmi başına enerji yoğunluğudur. Elektrikli taşıtların kullanımının artmasıyla karbon dioksit emisyonunun da düşürülebilmesi bekleniyor. Kısa menzili, ciddi maddi yatırımı gibi elektrikli araçlarla ilgili dezavantajlar, elektrikli araçların yaygınlaşmasının önüne geçmektedir. Batarya maliyetlerini düşürmek için, 100 km gibi bir menzille "Toyota e-com" (Sakai vd., 1999) tanıtıldı. Ancak ticari elektrikli araç üretimi için ekonomik bir sistem gereklidir (Arya ve Verma, 2020).

3.3.2. Kablosuz Cihazlarda (Wireless Devices)

1997 yılına gelinene kadar cep telefonlarında genellikle ana güç kaynağı olarak Ni-Cd piller kullanılmaktaydı. Ni-Cd pillerin sahip olduğu, hafıza etkisi, çalışma esnasında ısınma, kadmiyum elementinden kaynaklı yüksek toksisite, yeterli gücü sağlamak için gereken büyük boyut (telefon ağırlığının yaklaşık yarısı) gibi dezavantajlarından dolayı yeni bir şarj edilebilir pil teknolojisine ihtiyaç doğmuştur. Bu ihtiyaca karşı 1997'de Motorola firması Ni-MH pil teknolojisine sahip "166C" modelini piyasaya sürdü. Bu Ni-MH piller, Ni-Cd pillere kıyasla daha ince, daha hafif, toksik olmayan, daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması ve daha düşük hafıza etkisi gibi özelliklerinden dolayı ön plana çıktı. Ayrıca enerji depolama kapasitelerinde 950 mAh'den (Ni-Cd piller) 1300 mAh'ye (Ni-MH piller) önemli bir artış vardır. Bekleme süresi (telefon ile arama ya da başka bir işlem yapmadan sadece bekleme yapılarak telefonun açık kalabildiği süre) Ni-MH tabanlı cep telefonlarında 50 saate çıkarıldı (Arya ve Verma, 2020).

Fotoğraf makinelerinde piksel çözünürlüğünü artırmak ve cihaz üzerinde sabit olarak yer alabilecek flaşları da eklemek için yüksek kapasiteli pillere ihtiyaç vardır. Bu ihtiyacı karşılamak için 1998 yılında, Nikon markası Ni-MH pil tabanlı dijital tek lensli refleks kamera modeli "D1" piyasaya sürdü. Ni-MH piller ayrıca, tıbbi cihazlar ve donanımlar, video kameralar, elektrikli traş makineleri, çağrı cihazları gibi bazı taşınabilir cihazlarda kullanılmaktadır ayrıca telekomünikasyon, akıllı şebeke ve UPS gibi yüksek güçlü statik uygulamalarda kullanım alanlarından (Arya ve Verma, 2020).

3.4. Lityum İyon Pillerin Kullanım Alanları (Usage Areas of Lithium Ion Batteries)

Sony firması Lityum iyon pilleri ilk kez ticari olarak piyasaya süren firmadır, Sony firmasının arkasından kısa süre sonunda bazı başka şirketlerde lityum iyon pil üretimini başlatarak ticari olarak bu piyasaya dâhil oldu.

Lityum iyon pil ticari olarak piyasalara hızlı bir giriş yaparak yüksek satışlara sahip olmuştur. Takvimler 1998'i gösterdiğinde sadece Japonya içinde yıllık 2,1 milyar dolar ederinde 190 milyon Li-İyon pil üreticiler tarafından piyasaya sürülmekteydi. Günümüze bakarsak Li-iyon pillerin farklı ülkelerde üretimine devam edilmektedir ve her yıl kabaca 500 milyon Li-iyon pil üretimi yapılmaya devam edilmektedir. Üretimi yapılan bu piller temel olarak dijital kameralarda, cep telefonlarında ve laptop bilgisayarlarda kullanılmaktadır (Turhan, 2011). Ayrıca kişisel taşımacılıkta (motosiklet, bisiklet vb.), otobüs ve toplu taşımacılıkta, ağır iş kamyonlarında, robotik ve otonom sistemlerde, deniz altı ve deniz üstü araçlarda, hava uzay teknolojilerinde de kullanılmaktadır (Warner, 2015).

Li-iyon piller 3,7 volt gerilim üretebilmektedir ve nikel-kadmiyum, nikel-metal hidrit gibi pillerin kabaca 3 katı gerilim üretebilmektedirler. Başka sekonder piller ile karşılaştırıldığında hacimsel ve kütleli enerjilerinin yoğunluklarının yüksekliği, daha fazla gerilim üretmeleri, kullanılmadığında deşarj olma durumunun az olması, hafıza etkisinin görülmemesi gibi pozitif özelliklerinden dolayı en yaygın kullanımdaki pil çeşitlerinden biridir (Er, 2016).

4. Şarj Edilebilir Pillerin Şarj Metotları (Rechargeable Batteries Charging Methods)

4.1. Geleneksel Yöntemler İle (With Conventional Charging)

Bir pili şarj etmek için geleneksel yaklaşımda kullanılan birkaç teknik vardır. Tüketici ürünlerinde ilk ve en yaygın olanı, sabit akım damlama yüküdür. Bu şarj yöntemi, bataryaya çok düşük, sabit bir akım oranı sağlar ve batarya tam kapasiteye döndüğünde şarjı durdurmak için kullanıcı müdahalesine güvenir. Bu yavaş, "gece şarj cihazları" genellikle bir pili yaklaşık on saat içinde tamamen şarj edecek şekilde tasarlanmıştır. Çok ekonomiktirler ve tasarımları basittir ancak pilin performansını optimize edebilecek özellikleri yoktur. Düşük şarj hızları, kimyasal reaksiyonların elektrot yüzeyinde sınırlandırılmış olmasına ve dendrit büyümesi potansiyeline sebebiyet verir (Cope ve Podrazhansky, 1999).

Geleneksel yöntemlerden bir diğeri, sabit voltaj ile beslemedir. Pilin ne zaman tam olarak şarj edildiğini belirleyecek ve şarjı sonlandırarak olan ilkel şarj kontrol devresinin eklenmesini gerektirir. Bu yöntemin avantajı, eşdeğer bir şarjın sadece iki ila üç saat içinde elde edilmesidir. Bununla birlikte, bu yaklaşım aynı zamanda pil içindeki elektrokimyasal süreci de göz ardı ederek uzun vadede önemli olumsuz etkilere neden olur (Cope ve Podrazhansky, 1999). Bu yöntemde, işlem boyunca sabit bir voltaj korunur. Sabit voltaj korunurken, başlangıç akımı çok yüksek olur. Yüksek bir başlangıç akımı, yüksek sıcaklık artışlarına neden olur ve bu nedenle pilin ömrü etkilenir. Ancak bu şarj yönteminin çok kararlı bir çıkış voltajına sahip olması gerekir. Bu şarj yöntemi, yüksek maliyetle sonuçlanan yüksek akım kapasitesi gereksinimi nedeniyle pratik değildir (Lavety vd., 2020).

Sabit akım şarj yaklaşımındaki bir sapma, sabit akım/sabit voltaj şarj metodudur. Bu düzenleme altında, akü voltajı önceden belirlenmiş bir değere yükselene kadar sabit bir akım uygulanır, bu noktada şarj voltajı sabit tutulur ve akım azalır. Akım minimum değere ulaştığında şarj durur. Bu yaklaşım, reaksiyona girecek daha az elektrot yüzeyi olduğunda ve toplam iyon konsantrasyonu daha düşük olabileceğinde, şarjın son aşamasında akımı düşürür. Bu yaklaşım, sabit şarj rejimi ile aynı sorunlardan biraz daha az derecede muzdariptir (Cope ve Podrazhansky, 1999).

4.3. Darbe Yöntemi İle (With Pulse Method)

Darbe yükleme teknikleri iki moddan oluşur; birinci moda, yüksek pozitif akımın aküye aktığı şarj aşaması denir. İkinci mod, elektrolit reaksiyon sürecinin iyileştirilmesi nedeniyle aküden hiçbir akımın akmadığı dinlenme aşaması olarak adlandırılır. Darbeli şarj yöntemi, şarj sırasında sülfatlama plakalarını yüksek frekansta kaldıracaktır (üst üste bindirilmiş yöntem). Bu yöntem iki aşamadan oluşmaktadır; birinci fazın pozitif bir değeri vardır, bu da akünün içindeki akımı geçirmek ve şarj etmek için kullanılır. İkinci faz, aküye herhangi bir voltaj uygulamaz. Kimyasalını geliştirmek için pilin rahat bir aşamasıdır ve bu şekilde ölü pilleri geri yüklemek için kullanılabilir. Bunun nedeni elektrotlar üzerinde biriken kükürdün giderilebilmesidir (Serhan ve Ahmed, 2018).

4.4. Hızlı Şarj Yöntemi İle (With Boostcharging Method)

Elektronik cihazlar insanların günlük yaşamında giderek daha önemli hale gelirken, hızlı şarj yöntemine olan ihtiyaç bir zorunluluk haline geldi. Güvenlik koşulları ve çevrim ömrü gereksinimleri nedeniyle, standart şarj yöntemi ile şarj süreleri uzundur. Bu gerçek günümüzde kabul edilemez. Bu nedenle Li-iyon piller için ultra hızlı şarj yöntemi olarak "boostcharging" adı verilen bir şarj yöntemi geliştirilmiştir, bu sayede neredeyse tamamen boşalmış piller çok yüksek akımla kısa süreliğine yeniden şarj edilebilir. Pili yüksek akımla şarj etmenin zararlı

etkisi dikkate alınır, böylece boostcharge yöntemi herhangi bir olumsuz bozulma etkisi yaratmaz (Ayoub ve Karami, 2015)

5. Sonuç (Result)

Piller uzun süredir piyasada olmasına rağmen, performanslarını yöneten temel yapı-özellik ilişkilerinin temel bir anlayışı ancak son birkaç on yılda elde edilmiştir. Bu şekilde, elektrokimyasal süreçlerin ve reaksiyon mekanizmalarının daha derinlemesine anlaşılması, kimyagerlere alanda ilerleme sağlamak için yeterli araçları sağlamıştır. Pillerin kimyası konusu, hali hazırda performans olarak ilerleme sağlamış olan yoğun araştırma faaliyetlerinin konusudur. Bunlar, seçilen uygulamaların (yani taşınabilir elektroniklerin) geliştirilmesi için kritik öneme sahiptir; elektrikle çalışan taşıtların kullanımı için parlak umutlar vaat ediyor ve gelecek yıllarda kesinlikle yeni enerji depolama konseptlerini ortaya çıkaracak (Palacin, 2009).

Hibrit ve elektrikli araçların üretiminde başarıyı yakalamak için güvenilir, ucuz bir enerji depolama sistemi kaçınılmazdır. Bu makalede, bunun gibi enerji depolama sisteminden kaynaklanan sorunları çözmek için farklı seçenekler özetlenmiştir. Kurşun asit gibi eski ama hala geçerli pillerin ve lityum iyon pil gibi yeni geliştirilen enerji depolama sistemlerinin sunduğu farklı senaryolar gözden geçirildi. Her bir elektrokimyasal pilde sunulan avantaj ve dezavantajlar; yüksek güce, yüksek kapasiteye ve sonsuz çevrim döngüsüne sahip mükemmel bir pilin var olmadığını göstermiştir (Conte, 2006).

Önümüzdeki kısa zaman içerisinde, lityum iyon bataryaların pozitif elektrotunun enerji yoğunluğunda kademeli artışlarla (ve bunun etkisiyle maliyet düşüşleri) iyileştirmelerin devam etmesi muhtemeldir. Ayrıca, yapılmakta olan çalışmalara bakıldığında elektrokimyasal enerji depolama teknolojisinin çehresini radikal bir biçimde değiştirebilecek daha çok merak uyandıran gelişmiş pil kimyası araştırmaları vardır. Lakin Li-Hava gibi bu araştırmaların birçoğu, ticari gelişmelerden uzak kalmaya devam etmektedir. Yakın gelecekte, ülkelerin enerji depolamayla ilgili araştırma gündemlerine girmeyi başaran Na-İyon ve Li-S bataryaların kullanımda olacağını düşünülmektedir (Middlemiss ve Holland 2018).

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Algül, H., 2015. Lityum Hava Pilleri İçin Ag/Mg Katkılı Anot Malzemelerinin Geliştirilmesi (Development of Increased Corrosion Resistance Anode Materials for Lithium Air Batteries), Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 74s, Sakarya.
- Aras, U.T., 2009. Hibrit Elektrikli Araçların Batarya Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Performans Analizi (Computer Aided Performance Analysis of Battery Systems of Hybrid Electrical Vehicles), Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 43s, Kocaeli.
- Arya, S., Verma, S., 2020. Nickel-Metal Hydride (Ni-MH) Batteries, Rechargeable Batteries, ss.131-176.
- Ayoub, E., Karami, 2015. Review on The Charging Techniques of a Li-ion Battery, Third International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering.
- Başaran, K., Çetin, N.S., Çelik, H., 2011. Rüzgar-Güneş Hibrit Güç Sistemi Tasarımı ve Uygulaması (Wind-Solar Hybrid Power System Design and Application), Conference: 6th International Advanced Technologies Symposium.
- Cheng, X.-B., Huang, J.-Q., Zhang, Q., 2018. Review—Li Metal Anode in Working Lithium-Sulfur Batteries, Journal of the Electrochemical Society, 165(1), 6058-6072.
- Cheng, X.-B., Zhang, R., Zhao, C.-Z., Zhang, Q., 2017. Toward Safe Lithium Metal Anode in Rechargeable Batteries: A Review, Chemical Reviews, 117(15), 10403-10473.
- Choi, J.W., Aurbach, D., 2016. Promise and Reality of Post-Lithium-Ion Batteries With High Energy Densities, Nature Reviews Materials, 1(4).
- Conte, F.V., 2006. Battery and Battery Management for Hybrid Electric Vehicles: A Review, e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, 123(10), 424-431.
- Cope, R. C., Podrazhansky, Y., 1999. The Art of Battery Charging, Fourteenth Annual Battery Conference.
- Dell, R.M., Rand, D.A.J., 2001. Understanding Batteries, The Royal Society of Chemistry, ss.100-101.
- Demir, U., Aküner, M.C., 2018. Design and Optimization of In-Wheel Asynchronous Motor for Electric Vehicle, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33(4), 1517-1530.
- Demirci, O., Demirci, B.A., Taşkın, S., 2019. Battery Cell Measurement and Fault Diagnosis System for Detection of Problem in Automotive Batteries, Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 25(5), 546-552.
- Deng, J., Luo, W.-B., Chou, S.-L., Liu, H.-K., Dou, S.-X., 2017. Sodium-Ion Batteries: From Academic Research to Practical Commercialization, Advanced Energy Materials, 8(4), 17014128.
- Din, E., Schaef, C., Moffat, K., Stauth, J.T., 2017. A Scalable Active Battery Management System With Embedded Realtime Electrochemical Impedance Spectroscopy, IEEE T. Power Electr., 32 (7), 5688-5698.

- Disosway, M., 1998. Development of High Power Nickel-Cadmium Batteries for Hybrid Vehicles, In Thirteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances, Proceedings of the Conference.
- Er, M., 2016. Sn-Sb-Cu-C ve Sn-Co-C Sentezi ve Lityum İyon Pil Anot Materyali Olarak Kullanılmalarının İncelenmesi (Synthesis of Sn-Sb-Cu-C and Sn-Co-C and Investigation of Them Using as Anode Material for Lithium Ion Batteries), Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 95s, Sakarya.
- Etacheri, V., Marom, R., Elazari, R., Salitra, G., Aurbach, D., 2011. Challenges in the Development of Advanced Li-Ion Batteries: a Review, *Energ. Environ. Sci.*, 4 (9), 3243-3262.
- Gençten, M., 2013. Kurşun Asit Akülerin Performanslarının Artırılması (Increasing the Performance of Lead Acid Batteries), Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 134s, Eskişehir.
- Güneş, D., Tekdemir, İ.G., Karaarslan, M.Ş., Albayrak, B., 2018. Assessment of the Impact of Electric Vehicle Charge Station Loads on Reliability Indices, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(3), 1073-1084.
- Hatipoğlu, G., 2019. Lityum İyon Piller İçin Metalurjik Silisyum/KNT/Grafen Çok Fonksiyonlu Anotların Geliştirilmesi (Development of Metallurgical Silicon / CNT / Graphene Multifunctional Anodes for Lithium Ion Batteries), Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 242s, Sakarya.
- <https://tap.org.tr/pil-atik-pil/sss/pil-nedir/> Erişim Tarihi: 12.05.2021
- <https://technoluxpro.com/tr/akkumulyatory/batarei/nizn.html> Erişim Tarihi: 16.05.2021
- <https://reactual.com/portable-electronics/nizn-batteries.html> Erişim Tarihi: 15.05.2021
- Hung, Y., Yin, L., Wang, J., Wang, C., Tsai, C., Kuo, Y., 2018. Recycling of Spent Nickel-Cadmium Battery Using a Thermal Separation Process, *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 39 (2), 645-654.
- Jeyaseelan, C., Jain, A., Khurana, P., Kumar, D., Thatai, S., 2020. Ni-Cd Batteries, *Rechargeable Batteries*, s.177-194.
- Kocaman, A.S., 2019. Optimization of Hybrid Energy Systems With Pumped Hydro Atorage- A Case Study for Turkey, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(1), 53-67.
- Lavety, S., Keshri, R. K., Chaudhari, M. A., 2020. Evaluation of Charging Strategies for Valve Regulated Lead-Acid Batteries, *IEEE Access*, 8, 164747-164761.
- Ledovskikh, A., Verbitskiy, E., Ayeb, A., Notten, P.H.L., 2003. Modelling of Rechargeable NiMH Batteries, *Journal of Alloys and Compounds*, 356-357, 742-745.
- Ma, Z., Yuan, X., Li, L., Ma, Z.-F., Wilkinson, D.P., Zhang, L., Zhang, J., 2015. A Review of Cathode Materials and Structures for Rechargeable Lithium-Air Batteries, *Energy and Environmental Science*, 8(8), 2144-2198.
- Middlemiss, L., Holland, A., 2018. A Review of Post-Lithium-Ion Batteries, *EPSRC CDT in Energy Storage & Its Applications*.
- Miller, P., 2015. Automotive Lithium-Ion Batteries, *Johnson Matthey Technology Review*, 59(1), 4-13.
- Mirzaeian, M., Hall, P.J., 2009. Preparation of Controlled Porosity Carbon Aerogels for Energy Storage in Rechargeable Lithium Oxygen Batteries, *Electrochimica Acta*, 54(28), 7444-7451.
- Moralı, U., Erol, S., 2020. Electrochemical Impedance Analysis of 18650 Lithium-Ion and 6HR61 Nickel-Metal Hydride Rechargeable Batteries, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(1), 297-309.
- Morimoto, K., Nagashima, I., Matsui, M., Maki, H., Mizuhata, M., 2018. Improvement of Electrochemical Properties and Oxidation/Reduction Behavior of Cobalt in Positive Electrode of Ni-Metal Hydride Battery, *J. Power Sources*, 388, 45-51.
- Mulder, G., Omar, N., Pauwels, S., Meeus, M., Leemans, F., Verbrugge, B., De Nijs, W., Van den Bossche, P., Six, D., Van Mierlo, J., 2013. Comparison of Commercial Battery Cells in Relation to Material Properties, *Electrochim. Acta*, 87, 473-488.
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., Yushin G., 2015. Li-ion Battery Materials: Present And Future, *Materials Today*, 18, 252-264.
- Omar, N., Firouz, Y., Monem, M.A., Samba, A., Gualous, H., Coosemans, T., Van den Bossche, P., Mierlo J.V., 2014. Analysis of Nickel-Based Battery Technologies for Hybrid and Electric Vehicles, *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, Elsevier.
- Özdoğan, E., 2010. Atık Nikel Kadmiyum Pillerin Geri Kazanımına Yönelik Proses Geliştirilmesi (Development of a Recycling Process for Waste Nickel Cadmium Batteries), Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 102s, İstanbul.
- Özermiş, M.E., 2010. Kurşun Asit Akülerin Optimum Şarj Olmasını Sağlayan Şarj Devresi (Charging Circuit Providing Optimum Charging of Lead Acid Batteries), Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 80s, Denizli.
- Palacin, M.R., 2009. Recent Advances in Rechargeable Battery Materials: A Chemist's Perspective, *Chemical Society Reviews*, 38(9), 2565-2575.
- Polat, B.D., Keleş, Ö., 2013. Lityum İyon Pil Teknolojisi (Technology of Lithium Ion Battery), *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, Metalurji Mühendisleri Odası*, 162, 42-48.
- Rahman, M.A., Wang, X., Wen, C., 2013. High Energy Density Metal-Air Batteries: A Review, *Journal of the Electrochemical Society*, 160(10), 1759-1771.
- Rand, D.A.J., Moseley, P.T., Garche, J., Parker, C.D., 2004. Valve-Regulated Lead-Acid Batteries, Elsevier, s. 1-14, s.121-122.
- Sakai, T., Uehara, I., Ishikawa, H., 1999. R and D on Metal Hydride Materials and Ni-MH Batteries in Japan, *Journal of Alloys and Compounds*, 293-295, 762-769.
- Scrosati, B., Garche, J., 2010. Lithium batteries: Status, Prospects and Future, *Journal of Power Sources*, 195, 2419-2430.
- Serhan, H. A., Ahmed, E. M., 2018. Effect of the Different Charging Techniques on Battery Life-time: Review, 2018 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE).
- Slater, M.D., Kim, D., Lee, E., Johnson, C.S., 2012. Sodium-Ion Batteries, *Advanced Function Materials*, 23(8), 947-958.
- Turhan, M., 2011. Li-İyon Pil Destekli Yakıt Pili Güç Sisteminin Su Üstü Platforma Uygulanması (Application of a Power Control With a Li-Ion Battery Supported Powerful Fuel Cell to Surface Ship), Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 161s, Kocaeli.
- Uz, U., 2019. Hexacopter Yapısında Bir İnsansız Hava Aracı İle Elektronik İlaçlama/Sulama Sisteminin Oluşturulması (The Production of Electronic Pharmaceutical / Irrigation System With an Unmanned Aerial Vehicle in Hexacopter Structure), Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 84s, İstanbul.

- Wang, D.-W., Zeng, Q., Zhou, G., Yin, L., Li, F., Cheng, H.-M., Gentle, I.R., Lu, G.Q.M., 2013. Carbon-Sulfur Composites for Li-S Batteries: Status and Prospects, *Journal of Materials Chemistry A*, 1, 9382-9394.
- Warner, J., 2015. *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design*, Elsevier, ss.177-210.
- Xia, X., Dahn, J.R., 2012. Study of the Reactivity of Na/Hard Carbon with Different Solvents and Electrolytes, *Journal of the Electrochemical Society*, 159(5), 515-519.
- Yabuuchi, N., Kajiyama, M., Iwatate, J., Nishikawa, H., Hitomi, S., Okuyama, R., Usui, R., Yamada, Y., Komaba, S., 2012. P2-type $\text{Na}_x[\text{Fe}_{1/2}\text{Mn}_{1/2}] \text{O}_2$ Made From Earth-Abundant Elements for Rechargeable Na Batteries, *Nature Materials*, 11(6), 512-517.
- Yabuuchi, N., Kubota, K., Dahbi, M., Komaba, S., 2014. Research Development on Sodium-Ion Batteries, *Chemical Reviews*, 114(23), 11636-11682.
- Yan, S., Nei, J., Li, P., Young, K., Simon Ng, K.Y., 2017. Effects of Cs_2CO_3 Additive in KOH Electrolyte Used in Ni/MH Batteries, *Batteries, Nickel Metal Hydride Batteries 2017*, 3(4), 41.
- Ying, T., Gao, X., Hu, W., Wu, F., Noreus, D., 2006. Studies On Rechargeable NiMH Batteries, *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 525-530.
- Yu, J., Lee, H., Lee, P.S., Lee, J., 2000. Effect of Cu Powder as an Additive Material on the Properties of Zr-Based Pasted Alloy Electrodes for Ni/MH Batteries, *Journal of The Electrochemical Society*, 147 (7), 2494-2497.
- Yu, Y., Ji, X., Fan, H., 2018. Post Lithium Ion Batteries for Emerging Energy Storage Technologies, *Green Energy and Environment*, 3, 1.
- Zhu, W.H., Zhu, Y., Tatarchuk, B.J., 2014. Self-Discharge Characteristics and Performance Degradation of Ni-MH Batteries for Storage Applications, *Int. J. Hydrogen Energ.*, 39 (34), 19789-19798.



TÜRKİYE'DE GIDA MÜHENDİSLİĞİ EĞİTİMİ

Sencer BUZRUL*

Konya Gıda ve Tarım Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Gıda Mühendisliği,
Eğitim Programı,
Akreditasyon,
Mühendislik,
Lisans Öğretimi.*

Öz

Bu çalışmada Türkiye'de Gıda Mühendisliği Eğitimi ele alınmıştır. Ülkemizde bulunan 207 üniversitenin web siteleri tek tek incelenmiş ve gıda mühendisliği bölümü yer alanlar mercek altına alınmıştır. Buradan elde edilen veriler aynı zamanda Yükseköğretim Kurulu'nun (YÖK) istatistikleri ile de karşılaştırılmıştır. Mevcut durumda ülkemizde 70'den fazla gıda mühendisliği bölümü olduğu ancak bunların bir kısmının kapandığı ve/veya öğrenci almadığı, bir kısmında yeterli çalışan (öğretim üyesi, araştırma görevlisi, teknisyen) bulunmadığı, bazı bölümlerde altyapı eksiklikleri olduğu, özellikle son yıllarda bazı bölümler için açılan kontenjanların boş kaldığı görülmüştür. Güncel istatistiklere (2020) göre gıda mühendisliği bölümlerinde 13.532'si lisans, 2401'i yüksek lisans ve 1081'i doktora olmak üzere toplam 17.014 öğrenci bulunmaktadır. Kız öğrencilerin sayısı erkek öğrencilerin sayısının 2 katından fazladır. Gıda mühendisliği bölümlerinde 914 öğretim elemanı (profesör, doçent, doktor öğretim üyesi, öğretim görevlisi, araştırma görevlisi) görev yapmaktadır ve burada da kadın çalışanların erkek çalışanlardan fazla olduğu görülmüştür. Sadece 16 bölümün akredite (ABET veya MÜDEK) olduğu ve sadece 9 bölümün %100 İngilizce eğitim verdiği tespit edilebilmiştir. Tüm bu tespitler ışığında, çalışmanın son kısmında ülkemizdeki gıda mühendisliği eğitiminin iyileştirilebilmesi için bir takım öneriler maddeler halinde ortaya konmuştur.

FOOD ENGINEERING EDUCATION IN TURKEY

Keywords

*Food Engineering,
Curriculum,
Accreditation,
Engineering,
Undergraduate Education.*

Abstract

Food engineering education in Turkey was evaluated in this study. The websites of 207 universities in Turkey were examined one by one and those with food engineering departments were analyzed. The data obtained here were also compared with the statistics of the Council of Higher Education (YÖK). Currently, there are more than 70 food engineering departments in Turkey, however it was observed that some of them are closed and/or do not accept students, some of them do not have sufficient staff (faculty members, research assistants, technicians), there are lack of infrastructure in some departments, and the quotas of some departments were found to be vacant especially in recent years. According to current statistics (2020), there are a total of 17,014 students of which 13,532 are undergraduate, 2401 are M.Sc. and 1081 are Ph.D. students in food engineering departments. The number of female students is more than twice the number of male students. There are 914 academicians (professors, associate professors, assistant professors, lecturers, research assistants) working in food engineering departments, and it has been observed that female employees are also more than male employees. It was determined that only 16 departments are accredited (ABET or MÜDEK) and only 9 departments provide 100% English education. In the light of all these findings, some suggestions, in the last part of the study, were put forward in order to improve the food engineering education in Turkey.

Alıntı / Cite

Buzrul, S. (2022). Türkiye'de Gıda Mühendisliği Eğitimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 310-317.

* İlgili yazar / Corresponding author: sencer.buzrul@gidatarim.edu.tr, +90-332-223-5360

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
S. Buzrul, 0000-0003-2272-3827	Başvuru Tarihi / Submission Date	02.06.2021
	Revizyon Tarihi / Revision Date	12.09.2021
	Kabul Tarihi / Accepted Date	16.09.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Gıda Mühendisliği (GM), sadece ülkemizde değil Dünya’da da maalesef tam olarak anlaşılabilmiş bir kavram değildir (Niranjan, 2016). Bazıları için çok az şey ifade ederken (Jowitt, 2002) bazıları için ise hiçbir şey ifade etmemektedir. Peki, GM nedir veya nasıl tanımlanır? Eğer amacımız insanları bilgilendirmekse “GM büyük ölçekli gıda üretimi ve teknolojileri ile ilgilenen mühendislik dalıdır” demek yeterlidir (Niranjan, 2016). Daha kapsamlı bir tanım yapmak gerekirse GM ile ilgili pek çok tanım bulmak mümkündür. Örneğin, Earle (1966)’e göre GM hammaddeleri uzun süre saklanabilmeleri için nihai ürünlere ya da korunmuş gıdalara dönüştüren süreçlerin incelenmesidir. Heldman ve Lund (2011) GM’ni şu şekilde tanımlamışlardır: GM gıda ve bileşenleriyle ilgili fiziksel ilkelerin tanımlanması, oluşturulması ve bu ilkelerin gıda ürünlerinin işlenmesi, paketlenmesi, depolanması, taşınması ve dağıtımına uygulanmasıdır. Aslına bakılırsa GM sağlık, çevre, ekonomi, hukuk gibi birçok farklı dalları içermektedir. Dolayısıyla yukarıdaki tanımlar yanlış olmamakla birlikte GM kapsamını belirlemek için yetersizdir. Bu nedenle, Niranjan (2016) tarafından ortaya konulan yeni tanımı çok daha uygun olabilir: GM, arzu edilen duysal, tokluk, sağlık ve esenlik özelliklerine sahip gıda ürünlerini tasarlama, formüle etme ve üretme işidir. Çeşitli ölçeklerde ürünleri ve ürün özelliklerini geliştirebilecek, en düşük çevresel etkiye sahip, işleme, paketlenme ve depolama sistemleri için tasarımlar geliştirmektedir.

Gıda mühendislerinin kendilerini “tarladan çatala” aralığında kısıtlamamaları son derece önemlidir (Niranjan, 2016) çünkü gıda-ekonomi ve özellikle gıda-sağlık ilişkisi tüketiciler için son 30 yılda kafa karıştıran bir olgudur. Son yıllarda paketli gıdanın sağlık riskleri içerdiği sözlü ve yazılı medyada maalesef birçoğu üniversite hocası olan kişiler tarafından sıklıkla tekrarlanmaktadır. Bunun çoğu gıda için doğru olmadığı, GM’nin insan sağlığıyla dolaylı da olsa ilişkili olduğu, birçok GM uygulamasının insan sağlığını korumak için yapıldığı vd. konular gıda mühendisleri vasıtasıyla halka bilimsel bilgiler ışığında açıklanmalıdır.

Nüfus ile ilgili yapılan tahminler 2050 yılında Dünya’da yaklaşık 10 milyar insanın olacağını bize söylemektedir. Bu bilgi GM’nin yukarıdaki son tanımıyla birlikte değerlendirildiğinde GM’nin ne kadar önemli olduğu daha rahat kavranabilir (Lund, 2002). Ülkemizin konumu ve tarım-gıda alanındaki potansiyeli göz önüne alınırsa GM dalının ülkemiz için de son derece önemli olduğu kolaylıkla anlaşılacaktır. Yaşamakta olduğumuz COVID-19 salgını insanların güvenli gıdaya ulaşabilme endişelerini daha da artırmış görünmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmanın amacı ülkemizde GM eğitiminin mevcut durumunu ortaya koymak ve eğitim kalitesini artırabilmek için bazı önerilerde bulunmaktır.

2. Tarihçe (History)

GM 1950’li yıllarda akademide ortaya çıkmış bir daldır (Aguilera, 2018). Her ne kadar yeni bir dal olsa da gıda ile ilgili uygulama ve işlemler (pişirme, kurutma, vd.) oldukça eskilere dayanmaktadır. GM’nin kökeninin Avrupa’da –özellikle Fransa’da– ziraat mühendisliğinden (Karel, 1997; Kostaropoulos, 2012) Amerika Birleşik Devletleri’nde (ABD) ise gıda bilimi ve teknolojisinden geldiği bilinmektedir (Karel, 1997). Ancak, bunların yanında Almanya’da GM kimya ve makina mühendisliğinden türemiştir (Kostaropoulos, 2012).

ABD’nde birçok üniversitede gıda bilimi ve teknoloji bölümleri 1950’li yıllarda kurulmaya başlanmıştır (Barbosa-Cánovas ve Juliano, 2002). ABD’de GM hala genel olarak mühendislik okullarından ziyade ziraat okullarında okutulmaktadır (Aguilera, 2018). Arjantin, Brezilya ve Meksika’da GM 1960’lı yılların sonunda gelişirken aslında Latin Amerika’da 1940’lı yıllardan itibaren kimya, ziraat mühendisliği ve kimya mühendisliği programlarının altında öğretildiği bilinmektedir (Walti-Chanes ve ark., 2002).

Ülkemizde ise GM’nin ortaya çıkışı 1970’li yılların ortasından sonra olmuştur (GMO, 2010). Ege Üniversitesi bünyesinde Gıda Teknolojisi Yüksek Okulu 1975-1976 yılında 40 öğrenci ile öğretime başlamıştır. Gıda Teknolojisi Yüksek Okulu 1977 yılında Gıda Fakültesi haline getirilmiş ve 1983 yılında da bölüm Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesine bağlanmıştır (https://food.ege.edu.tr/tr-1037/genel_tanitim.html). Hacettepe Üniversitesi’nde 1975 yılında Gıda Analizleri ve Teknolojisi Bölümü iki yıllık bir ön lisans programı olarak kurulmuş, aynı yıl 4 yıllık lisans programına dönüştürülmüştür. Bölüm 1977 yılında Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesine bağlanmış ve adı Gıda Mühendisliği Bölümü olarak değiştirilmiştir (<http://www.food.hacettepe.edu.tr/tr/menu/tarihce-4>). Ankara Üniversitesi’nde 1954 yılında kurulan Ziraat Teknolojisi Bölümü 1972 yılında Gıda ve Fermantasyon Teknolojisi, 1982’de Tarım Ürünleri Teknolojisi, 1989’da Gıda Bilimi ve Teknolojisi adını almıştır. Bölüm,

Üniversitelerarası Kurul'un 24 Mayıs 1993 ve Yükseköğretim Kurulu'nun (YÖK) 13 Mayıs 1994 tarihli kararları ile Gıda Mühendisliği Bölümüne dönüşmüştür (<http://food.eng.ankara.edu.tr/bolum-3/tarihce-2/>). Atatürk Üniversitesi'nde 1977 yılında Süt ve Gıda Teknolojisi Bölümü kurulmuş, bölüm 1982 yılında Tarım Ürünleri Teknolojisi, 1989 yılında Gıda Bilimi ve Teknolojisi, 1994 yılında ise Gıda Mühendisliği adını almıştır (<https://atauni.edu.tr/gida-muhendisligi-bolumu/tarihce>). Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde (ODTÜ) 1980 yılında Kimya Mühendisliği Bölümü içerisinde GM öğrenimine başlanmış (GMO, 2010), 1982 yılında ise ODTÜ Gıda Mühendisliği Bölümü kurulmuştur. ODTÜ Gaziantep Mühendislik Fakültesi bünyesinde 1976 yılında kuruluşuna başlanan Gıda Mühendisliği Bölümü, ilk mezunlarını 1984 yılında vermiştir. Haziran 1987'de Gaziantep Üniversitesi'nin kurulması ile ODTÜ Gaziantep Mühendislik Fakültesi bu Üniversiteye bağlanmış ve eğitimine % 100 İngilizce olarak devam etmektedir (<http://fe.gantep.edu.tr/pages.php?url=tarihce-8>). Bursa Uludağ Üniversitesi'nde (o dönemki adı Uludağ Üniversitesi) 1981 yılında Ziraat Fakültesi bünyesinde Tarım Ürünleri Teknolojisi Bölümü kurulmuş, daha sonra bölümün adı Gıda Bilimi ve Teknolojisi Bölümü olarak değiştirilmiş ve 1993 yılında Gıda Mühendisliği Bölümü kurulmuştur (<https://uludag.edu.tr/gida/konu/view?id=2804&title=uludag-universitesi-gida-muhendisligi-bolumu>). YÖK'ün 1993 yılında almış olduğu kararla "Ziraat Fakültesi Gıda Bilimi ve Teknolojisi" bölümleri "Gıda Mühendisliği" bölümlerine dönüştürülmüştür (GMO, 2010).

Şu anda ülkemizde tıpkı Brezilya, Şili ve Tayland'da olduğu gibi GM bağımsız bölümlerde okutulmaktadır. Çin'de gıda bilimi ve mühendisliği bölümleri varken GM Hindistan'da çoğunlukla ziraat üniversitelerinde ziraat mühendisliğinin bir parçasıdır. ABD, Avrupa, Avustralya ve Yeni Zelanda gibi yerlerde ise GM bir altküme gibi biyosistem, kimya ve makine mühendisliği gibi bölümlerde yer alabilmektedir (Niranjan, 2016).

3. Mevcut Durum (Current Situation)

YÖK'ün istatistiklerine bakıldığında ülkemizde 82 adet gıda mühendisliği bölümü (GMB) bulunduğu görülmektedir (<https://istatistik.yok.gov.tr>). Öte yandan, Türkiye'deki 207 üniversitenin web siteleri incelendiğinde 73'ünde GMB bulunduğu anlaşılmıştır (Tablo 1). Dolayısıyla YÖK istatistiklerinde yer alan bölümlerin bazıları ilgili üniversitelerin web sitesinde görünmemektedir. Buradan bu bölümlerin aktif olmadığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Tablo 1'de yer alan üniversitelerden 9 tanesi vakıf üniversitesi olup, gerisi devlet üniversitesidir. Son 4 yılda üniversitelerin GMB'lerine yerleşen öğrencilere bakıldığında Tablo 1'de yer alan bazı üniversitelerin bu bölümler için kontenjan açıklamadığı, kontenjan açıklanan üniversitelerde ise bu kontenjanların bir kısmının dolmadığı, bazılarında ise hiç öğrenci girmediği anlaşılmıştır. Ancak, bu durum sadece GM'ne özgü değildir. Örneğin, kimya, çevre, metalurji ve malzeme, maden, jeoloji mühendisliklerinde de benzer bir durum göze çarpmaktadır. Bazı GMB'lerinde ikinci öğretim bulunduğu ancak son yıllarda ikinci öğretime öğrenci alınmadığı da görülmüştür.

Ölçme, Seçme ve Yerleştirme Merkezi (ÖSYM) tarafından açıklanan 2020 yılı sonuçlarına göre Tablo 1'de yer alan üniversitelerden sadece 46'sı için kontenjan belirlenmiş, bunlardan 2 tanesine hiç öğrenci yerleşmemiş 24 tanesinde ise belirlenen kontenjandan dolmamıştır. Yani sadece 20 üniversitenin GMB'lerinin kontenjanları tamamen dolmuştur. 2020 yılında toplam 1404 öğrenci üniversitelerin GMB'lerine yerleşmiştir (<https://yokatlas.yok.gov.tr/netler-tablo.php?b=10082>). Hayoglu ve ark. (2016)'na göre ülkemizde yaklaşık 5000 GM öğrencisi eğitim almakta ve 1000 öğrenci de mezun olmaktadır. YÖK'ün güncel istatistiklerine göre ülkemizde 13.532 GM lisans öğrencisi (886'sı ikinci öğretim) bulunmaktadır. Lisansüstü eğitime bakıldığında ise 2401 yüksek lisans ve 1081 doktora öğrencisi olduğu görülmektedir. Özetle, ülkemizde GMB'lerinde lisans ve lisansüstü öğrenci toplamı 17.014'tür. Kız öğrencilerin sayısı erkek öğrencilerin sayısının yaklaşık 2,5 katıdır (<https://istatistik.yok.gov.tr>).

Tablo 1. Türkiye'deki Gıda Mühendisliği Bölümleri (Food Engineering Departments in Turkey)

Sıra no.	Üniversite	Tarih ¹	Fakülte	Türü
1	Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi	2014	Mühendislik	Devlet
2	Adıyaman Üniversitesi	— ²	Mühendislik	Devlet
3	Afyon Kocatepe Üniversitesi	2004	Mühendislik	Devlet
4	Akdeniz Üniversitesi	1989	Mühendislik	Devlet
5	Aksaray Üniversitesi	2013	Mühendislik	Devlet
6	Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi	2017	Mühendislik	Devlet
7	Ankara Üniversitesi	13.05.1994	Mühendislik	Devlet
8	Ardahan Üniversitesi	—	Mühendislik	Devlet
9	Atatürk Üniversitesi	1994	Ziraat	Devlet
10	Avrasya Üniversitesi	—	Mühendislik ve Mimarlık	Vakıf

11	Aydın Adnan Menderes Üniversitesi	2012	Mühendislik	Devlet
12	Balıkesir Üniversitesi	2014	Mühendislik	Devlet
13	Bayburt Üniversitesi	2009	Mühendislik	Devlet
14	Bingöl Üniversitesi		Mühendislik ve Mimarlık	Devlet
15	Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi	2004	Mühendislik	Devlet
16	Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi	2012	Mühendislik ve Mimarlık	Devlet
17	Bursa Teknik Üniversitesi	2012	Mühendislik ve Doğa Bilimleri	Devlet
18	Bursa Uludağ Üniversitesi	1993	Ziraat	Devlet
19	Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi	–	Mühendislik	Devlet
20	Çankırı Karatekin Üniversitesi	2012	Mühendislik	Devlet
21	Çukurova Üniversitesi	1994	Ziraat	Devlet
22	Ege Üniversitesi	28.03.1983	Mühendislik	Devlet
23	Erciyes Üniversitesi	18.08.1998	Mühendislik	Devlet
24	Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi	2018	Mühendislik	Devlet
25	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	16.04.2014	Ziraat	Devlet
26	Gaziantep Üniversitesi	1976	Mühendislik	Devlet
27	Giresun Üniversitesi	–	Mühendislik	Devlet
28	Gümüşhane Üniversitesi	2010	Mühendislik ve Doğa Bilimleri	Devlet
29	Hacettepe Üniversitesi	12.11.1977	Mühendislik	Devlet
30	Hakkari Üniversitesi	–	Mühendislik	Devlet
31	Harran Üniversitesi	2001	Mühendislik	Devlet
32	Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi	1993	Ziraat	Devlet
33	Hitit Üniversitesi	2009	Mühendislik	Devlet
34	Iğdır Üniversitesi	2010	Mühendislik	Devlet
35	İnönü Üniversitesi	–	Mühendislik	Devlet
36	İstanbul Aydın Üniversitesi	–	Mühendislik	Vakıf
37	İstanbul Okan Üniversitesi	2011	Mühendislik	Vakıf
38	İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi	–	Mühendislik ve Doğa Bilimleri	Vakıf
39	İstanbul Teknik Üniversitesi	1990	Kimya-Metalurji	Devlet
40	İzmir Ekonomi Üniversitesi	–	Mühendislik	Vakıf
41	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü	–	Mühendislik	Devlet
42	Kafkas Üniversitesi	24.06.2011	Mühendislik ve Mimarlık	Devlet
43	Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi	2004	Mühendislik ve Mimarlık	Devlet
44	Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi	2011	Mühendislik	Devlet
45	Kastamonu Üniversitesi	–	Mühendislik ve Mimarlık	Devlet
46	Kırklareli Üniversitesi	2012	Mühendislik	Devlet
47	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi	–	Mühendislik ve Mimarlık	Devlet
48	Konya Gıda ve Tarım Üniversitesi	2016	Mühendislik ve Mimarlık	Vakıf
49	Manisa Celal Bayar Üniversitesi	1992	Mühendislik	Devlet
50	Mersin Üniversitesi	1993	Mühendislik	Devlet
51	Munzur Üniversitesi ³	–	Mühendislik	Devlet
52	Muş Alparslan Üniversitesi	–	Mühendislik ve Mimarlık	Devlet
53	Necmettin Erbakan Üniversitesi	–	Mühendislik	Devlet
54	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi	2012	Mühendislik ve Mimarlık	Devlet
55	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi	2013	Mühendislik	Devlet
56	Ondokuz Mayıs Üniversitesi	1995	Mühendislik	Devlet
57	Ordu Üniversitesi	–	Ziraat	Devlet
58	Orta Doğu Teknik Üniversitesi	1982	Mühendislik	Devlet
59	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2009	Mühendislik	Devlet
60	Pamukkale Üniversitesi	1994	Mühendislik	Devlet
61	Sakarya Üniversitesi	1997	Mühendislik	Devlet
62	Selçuk Üniversitesi	1993	Ziraat	Devlet
63	Siirt Üniversitesi	2013	Mühendislik	Devlet

64	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	2000	Mühendislik	Devlet
65	Süleyman Demirel Üniversitesi	25.02.1994	Mühendislik	Devlet
66	Şırnak Üniversitesi	—	Ziraat	Devlet
67	Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi	—	Ziraat	Devlet
68	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi	—	Mühendislik ve Mimarlık	Devlet
69	Trakya Üniversitesi	2008	Mühendislik	Devlet
70	Uşak Üniversitesi	2015	Mühendislik	Devlet
71	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi	—	Mühendislik	Devlet
72	Yeditepe Üniversitesi	—	Mühendislik	Vakıf
73	Yıldız Teknik Üniversitesi	24.05.2011	Kimya-Metalurji	Devlet
74	Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi	2014	Mühendislik	Devlet

¹ "Gıda Mühendisliği" adı altında kuruluş ya da bölüme ilk öğrenci giriş tarihi

² Tespit edilememiştir.

³ Kapatılmıştır.

Yine bölümlerin web sitelerinden anlaşıldığı kadarıyla, bazı GMB'lerinin kapatıldığı, bazılarında araştırma görevlisi bulunmadığı, bazılarında ise 3 öğretim üyesinden daha az personel bulunduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, bazı GMB'lerinde belli konularda çalışan öğretim üyelerinde fazlalık göze çarpmaktadır. YÖK istatistikleri GMB'lerinde 253 profesör, 124 doçent, 235 doktor öğretim üyesi, 28 öğretim görevlisi ve 274 araştırma görevlisi olmak üzere toplam 914 kişinin görev yaptığını söylemektedir. Kadın çalışan sayısı erkek çalışan sayısının yaklaşık 1,5 katıdır (<https://istatistik.yok.gov.tr>). Bölümlerin web sitelerinde laboratuvar olanakları ile ilgili bilgiler de sınırlıdır, bazı bölümlerde hiç laboratuvar olmadığı izlenimi doğmakta, bazılarında ise laboratuvar altyapısının eksik olduğu anlaşılmaktadır.

GM eğitimi sadece 9 üniversitede %100 İngilizce olarak verilirken az sayıda üniversitede ise 30% İngilizce eğitim yer almaktadır. GM'de eğitim dili çoğunlukla Türkçedir. GMB'lerinin 2 tanesi ABET (Accreditation Board of Engineering and Technology) (<https://amspub.abet.org/aps/category-search?degreeLevels=B&countries=TR>), 14 tanesi de MÜDEK (Mühendislik Eğitim Programları Değerlendirme ve Akreditasyon Derneği) (<http://www.mudek.org.tr/tr/akredit/akredite2020.shtm>) akreditasyonuna sahiptir.

Ülkemizde 8 GMB'nde "intörn" uygulaması bulunmaktadır. Bu uygulamanın amacı 7 yarıyılta derslerini tamamlamış olan öğrencinin son döneminde (8. yarıyılında) "intörn mühendis" olarak 3-4 aylık süre boyunca gıda sanayinde çalışmasını sağlamaktır. Anlaşıldığı kadarıyla bazı bölümler bu uygulamayı zorunlu kılarken bazıları öğrenciye ders ya da uygulama olarak seçenek sunmaktadır.

GMB'lerinde okutulan lisans dersleri incelendiğinde genel olarak benzer programlar karşımıza çıkmaktadır. Farklılıklardan bahsetmek gerekirse bazı bölümlerde teknoloji dersleri tek tek yer alırken (örneğin, et teknolojisi, süt teknolojisi, meyve ve sebze teknolojisi) bazı bölümlerde sadece teknoloji dersi olarak bir veya iki dönem okutulmaktadır. Bir bölümde seçmeli olarak yer alan ders diğer bir bölümde zorunlu olabilmektedir (örneğin proses kontrol). GMB'lerinde temel derslerden (matematik, fizik, kimya, bilgisayar, istatistik vd.) sonra okutulan ve çoğu bölümde yer alan zorunlu dersler şunlardır: kütle ve enerji denklemleri, akışkanlar mekaniği, ısı ve kütle aktarımı (birlikte veya ayrı dersler olarak), kinetik, mühendislik ekonomisi, mikrobiyoloji (Bazı bölümlerde genel mikrobiyoloji ve gıda mikrobiyolojisi olmak üzere iki ayrı ders olarak yer almaktadır.), gıda kimyası, teknoloji dersleri, temel işlemler, ekipman tasarımı, ürün ve fabrika tasarımı ve laboratuvar uygulamaları. GMB'lerinin hepsinde zorunlu staj uygulaması bulunmaktadır ancak staj süresi bölümler arasında farklılık gösterebilmektedir. Örneğin 20 iş günü staj yaptıran bölümler olduğu gibi 30 iş günü staj yaptıran bölümler de vardır.

Bölümlerin web sitelerinden tespit edilebildiği kadarıyla Tablo 1'de yer alan GMB'lerinden 51 tanesinde yüksek lisans, 33 tanesinde de doktora programı bulunmaktadır. Lisans derslerinin aksine lisansüstü dersler çeşitlilik göstermektedir.

4. Sonuç ve Öneriler (Conclusion and Suggestions)

Ülkemizin gıda sanayi dikkate alındığında, geçmişte çok da eskilere dayanmayan GM eğitiminin oldukça önemli olduğu değerlendirilmektedir. Her ne kadar öğrenci kabul eden GMB'leri azalsa da mevcut bölüm sayısı fazla altyapı ise yetersizdir. GM eğitim niteliğinin artırılması ve ülkenin ihtiyacı olan gıda mühendislerinin yetiştirilebilmesi amacıyla, yeterli olmamakla birlikte, aşağıdaki önerilerimizin dikkate alınması faydalı olabilir:

- i) Ülkemiz gıda mühendisi ihtiyacının, orta ve uzun vadede, paydaşların (Gıda Mühendisleri Odasından, GMB'lerinden, gıda sanayinden, Tarım ve Orman Bakanlığı ve/veya devlet kurumlarından yetkili kişiler) bir araya gelerek acilen belirlenmesi gereklidir.
- ii) Mevcut GMB'leri; şehrin konumu, gıda sanayinin bölgedeki durumu ve geleceği göz önünde bulundurularak gözden geçirilmelidir. Herhangi bir şehirde yer alan bir bölümün çevre illerdeki diğer GMB'leri ile ortak lisans, yüksek lisans ya da doktora programı açıp açamayacağı (altyapı kullanımı, öğretim üyesi değişimi) değerlendirilmelidir.
- iii) Bazı GMB'lerinin kontenjanı 80-100 arasındayken bazıları 20-40 arasındadır. Gıda mühendisliği eğitimi uygulamaya dayalı olduğundan kontenjanların yüksek olması her öğrencinin bilgiye, en azından uygulamada, eşit olarak ulaşmasını güçleştirmektedir. Kontenjanlara sınırlama getirilmeli, eski ve köklü GMB'leri dahil, yıllık 40 öğrenciden fazla kontenjan açılmamalıdır. Burada (i) maddesindeki öneriyi de göz önünde bulundurarak uygun kontenjanlar belirlemek yerinde olabilir.
- iv) MÜDEK Avrupa Mühendislik Eğitimi Akreditasyon Ağı (ENAAE - European Network for Accreditation of Engineering Education) adlı kuruluşun üyesi ve 15 Haziran 2011 tarihinden beri Washington Accord (WA) imzacısıdır. MÜDEK ve ABET birbirine çok benzer mühendislik akreditasyonu veren kuruluşlardır. GMB'leri MÜDEK akreditasyon sürecine başlamalıdır. Böylece bölüm eksikliklerinin (altyapı, eğitim, akademik, idari ve teknik kadro) hızlıca tamamlanabilmesi için bir adım atılmış olacaktır.
- v) Akreditasyon zor ve meşakkatli bir iştir. Akreditasyona sahip bölümler için her şey aslında bitmiş değil yeni başlamış durumdadır. Akreditasyon kapsamında iç ve dış paydaşlar (öğrenciler, mezunlar, sanayi temsilcileri, öğretim üyeleri) arasında etkin iletişim oluşturulmalı, eğitim programlarının dinamik olduğu unutulmamalı, paydaşların görüş ve önerileri doğrultusunda programda güncellemeler ve iyileştirmeler yapılmalıdır. Program güncellemeleri akredite olmayan bölümlerin de yapabileceği önemli ve sürekli bir iştir.
- vi) Günümüzde aday öğrencilerin bir üniversite veya bölüm hakkında bilgi alabilmek için en çok kullandıkları araç internettir. Bölümlerin web sitelerini güncellemeleri bu nedenle çok önemlidir. Örneğin bazı bölümlerin sayfalarında "tarihçe" kısmı bulunmamakta ve bölüm sayfasını ziyaret eden kişiler bölümün geçmişi ile ilgili bilgi edinememektedirler. Aday öğrencilerin anlayabileceği bir dilde ayrı bir sayfa düzenlemek uygun olabilir. Mevcut öğrenciler için ise her türlü bilgi ve belgenin (ders içerikleri, staj formları, rapor şablonları vd.) web sitesinde güncel haliyle yer alması sağlanmalıdır.
- vii) Eğitim dili Türkçe olsa bile İngilizcenin etkin olarak kullanılabilmesi bir eğitim programı oluşturulmalıdır. Mesleki İngilizce derslerinin üniversitelerin hazırlık sınıfı mensupları tarafından değil yurt dışı tecrübesi olan bölüm hocaları tarafından verilmesi, öğrencilerin sınıfta derse etkin olarak katılımlarının sağlanması, ödev, sunum ve rapor hazırlamaları bu anlamda önemlidir. MÜDEK çıktılarında biri de en az bir yabancı dil bilgisidir. Ancak, programda İngilizce ya da Mesleki İngilizce derslerinin yer alması öğrencilerin bu yabancı dili kullanabileceği anlamına gelmemektedir ve bu konunun tüm bölümlerde öncelikle değerlendirmeye alınması önemlidir.
- viii) GMB'lerinde, genel olarak, derslerde bilgisayar kullanımı yeterli değildir ve bu artırılmalıdır. Birinci sınıf derslerinden (matematik, fizik, kimya, istatistik) itibaren öğrencilerin basit ve temel işlemler için Excel® vb. programları kullanması sağlanmalıdır. Bölüm dersleri için de (örneğin kinetik dersinde regresyon için) Excel® kullanılabilir. Isı aktarımı, kontrol ve tasarım derslerinde COMSOL® ve MATLAB® vb. programlardan yararlanılabilir. Ödevlerin sadece elde değil bilgisayar kullanılarak çözülebilecek olmasına dikkate edilmelidir. Ayrıca, tüm öğrencilere bir programlama dili öğretilmeli ve uygun derslerde öğrencinin bu dili kullanması sağlanmalıdır.
- ix) İntörn gıda mühendisi uygulamasının GMB'lerinin gıda işletmeleri ile olan bağlarını güçlendirebileceği ve mezuniyete yaklaşmış öğrenciler için bir fırsat olduğu değerlendirilmektedir. Dolayısıyla bölümlerin bu uygulamayı gözden geçirip uygulanabilirliğini düşünmeye başlamaları gereklidir. İntörn mühendislik uygulamasına sahip bölümlerin ise bu uygulamadaki eksiklikleri/aksaklıkları tespit edip iyileştirme yapmaları uygun ve yerinde olacaktır.
- x) Derslerin öğrenciye nasıl anlatıldığı veya aktarıldığı son derece önemli bir konudur. Örneğin akışkanlar mekaniği dersi GM için önemli bir mühendislik dersi olup, bu derste açıklayıcı örnekler, soru çözümü, laboratuvar uygulamaları gibi dersi destekleyici faaliyetlerin yapılması öğrenci

açısından son derece faydalı olacaktır. Erken yaşlardan itibaren teknoloji ile iç içe olduklarından günümüz öğrencileri geçmişten farklıdır; dikkatleri çabuk dağılmakta ve sözlü anlatım ya da sunum yerine görsel kanıtla (Adedeji, 2020) daha iyi öğrenebilmektedirler. Birçok öğrenci derste dersi dinlemek yerine cep telefonu ya da başka bir elektronik alet kullandığını itiraf etmektedir (Lenhart ve ark., 2010; Mendoza ve ark., 2018). Dolayısıyla yeni öğrenci profilini göz önünde bulundurarak GM programlarında değişiklik yapmak gerekli olabilir.

- xi) Eğitim programının “mühendislik” olduğundan hareketle, akışkanlar mekaniği, ısı ve kütle aktarımı, tasarım gibi dersler “sözel” olarak değil “sayısal” olarak öğrenciye aktarılmalıdır.† Karmaşık GM problemlerinin çözümüne öğrencinin hem sayısal hem de sözel derslerde öğrendiği bilgileri kullanarak yaklaşması gerektiği unutulmamalıdır.
- xii) Bölümlerde sıklıkla seminerler düzenlenmeli gıda sanayinden çalışanlar, mezunlar ve diğer üniversitelerden araştırmacılar davet edilmelidir. Bu seminerler sadece GM ile ilgili olmamalıdır. Farklı branşlardan (beslenme ve diyetetik, tıp, veterinerlik, gastronomi, ekonomi, hukuk vd.) uzmanlar da çağrılmalı ve öğrencilerle bir arada olmaları sağlanmalıdır.
- xiii) Bölüm kadrolarında farklı alanlarda çalışan öğretim üyelerinin bulunmasına dikkat edilmelidir. Örneğin 7 tane öğretim üyesi olan bir bölümde 4 kişinin de gıda mikrobiyolojisi çalışıyor olması istenen bir durum değildir. Bölümlerin gelecek planlarını yaparken bu hususu göz önünde bulundurmaları gereklidir.
- xiv) Günümüzde bilgiye ulaşmak son derece kolaydır. Ancak, ulaşılan bilginin ne kadar bilimsel ve/veya doğru olduğu tartışmalıdır. GM eğitimi sağlık, hukuk, mühendislik, kimya, biyoloji gibi birçok dalı barındırmaktadır. Bu kadar fazla bilgiyi öğrenciye yüklemek kolay değildir. Ancak, öğrencilere öğretebileceğimiz önemli bir şey vardır: “Doğru ve bilimsel bilgiye ulaşma yolları.” Bilimsel bilginin de evrilebileceği, dün için doğru kabul edilen bilginin günümüzde de doğru olarak kabul edilmesi için geçerli bir neden olmayacağı öğrencilere anlatılmalıdır.

Tesekkür (Acknowledgement)

Bu makalede yer alan görüşler yazarın kendi görüşü olup, herhangi bir kurumu bağlayıcı değildir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- ABET (Accreditation Board of Engineering and Technology), 2021. <https://amspub.abet.org/aps/category-search?degreeLevels=B&countries=TR>. Erişim tarihi: 20.05.2021
- Adedeji, A.A., 2020. Challenges and discovery of best practices for teaching food engineering to food science majors – My experience over first 5 years at the University of Kentucky. *Journal of Food Science Education*, 19, 7–9.
- Aguilera, J.M., 2018. Food engineering into the XXI century. *AIChE Journal*, 64, 2–11.
- Ankara Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 2021. <http://food.eng.ankara.edu.tr>. Erişim tarihi: 29.05.2021
- Atatürk Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 2021. <https://atauni.edu.tr/tr/gida-muhendisligi-bolumu>. Erişim tarihi: 23.05.2021
- Barbosa-Cánovas, G.V., Juliano, P., 2005. Introduction: Food engineering. G.V. Barbosa-Cánovas (Ed.), *Food engineering: Encyclopedia of life support systems* (s. 1–24). Paris: EOLSS Publishers.
- Bursa Uludağ Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 2021. <https://uludag.edu.tr/gida> Erişim tarihi: 23.05.2021
- Earle, R.L., 1966. *Unit Operations in Food Processing*. Pergamon, London.
- Ege Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 2021. <https://food.ege.edu.tr>. Erişim tarihi: 23.05.2021
- Gaziantep Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 2021. <http://fe.gantep.edu.tr/pages.php?url=tarihce-8https://food.ege.edu.tr>. Erişim tarihi: 15.09.2021
- GMO (Gıda Mühendisleri Odası), 2010. <https://www.gidamo.org.tr>. Erişim tarihi: 23.05.2021
- Hayoglu, I., Celik, S., Artık, N., Atasoy, A.F., 2016. Engineering education and current situation of food engineering in Turkey. *FEIIC International Journal of Engineering and Technology*, 1, 1–4.
- Hacettepe Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 2021. <http://www.food.hacettepe.edu.tr>. Erişim tarihi: 23.05.2021
- Jowitt, R., 2002. *International Congress on Engineering and Food: The first 25 years*. Welty-Chanes, J, Barbosa-Cánovas, G.V., Aguilera, J.M. (Eds.), *Engineering and Food for the 21st Century* (s. 57–63), CRC Press.

† Yazarın GMB'lerinde hem kişisel hem de MÜDEK değerlendircisi olarak yaşamış olduğu deneyime dayanılarak yazılmıştır.

- Karel, M., 1997. The history and future of food engineering. *Food Engineering* 2000, 3–19.
- Kostaropoulos, A., 2012. Food engineering within sciences of food. *International Journal of Food Studies*, 1, 2.
- Lenhart, A., Purcell, K., Smith, A., Zickuhr, K., 2010. Social media & mobile internet use among teens and young adults. millennials. Pew Internet & American Life Project, <http://pewinternet.org/Reports/2010/Social-Media-and-Young-Adults.aspx>
- Lund, D.B., 2002. Food engineering for the 21st century. Welte-Chanes, J, Barbosa-Cànovas, G.V.,Aguilera, J.M. (Eds.), *Engineering and Food for the 21st Century* (s. 3–14), CRC Press.
- Mendoza, J.S., Pody, B.C., Lee, S., Kim, M., McDonough, I.M., 2018. The effect of cellphones on attention and learning: The influences of time, distraction, and nomophobia. *Computers in Human Behavior*, 86, 52–60.
- MÜDEK (Mühendislik Eğitim Programları Değerlendirme ve Akreditasyon Derneği), 2021. <http://www.mudek.org.tr/tr/akredit/akredite2020.shtm>. Erişim tarihi: 20.05.2021
- Niranjan, K., 2016. A possible reconceptualization of food engineering discipline. *Food and Bioproducts Processing*, 99, 78–89.
- Welte-Chanes, J, Vergara-Balderas, F, Palou, E., Alzamora, S., Aguilera, J.M., Barbosa-Cànovas, G.V., Tapia, M.S., Parada-Arias, E., 2002. Food engineering education in Mexico, Central America, and South America. *Journal of Food Science Education*, 1, 59–65.
- YÖK (Yükseköğretim Kurumu), 2021. <https://yokatlas.yok.gov.tr/netler-tablo.php?b=10082> Erişim tarihi: 30.05.2021.
- YÖK (Yükseköğretim Kurumu) 2021. <https://istatistik.yok.gov.tr> Erişim tarihi: 31.05.2021.



TÜRKİYE'DE NESNELERİN İNTERNETİ (IOT) ALANINDA YAZILMIŞ YÜKSEK LİSANS TEZLERİNİN İNCELENMESİ-BİR META ANALİZ ÇALIŞMASI

Ayşe ALKAN^{1*}, İsmail KIRBAŞ²

¹ Samsun/İlkadım R.K. Bilim ve Sanat Merkezi, Samsun, Türkiye

² Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Burdur, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Nesnelerin İnterneti,
Bilimsel Araştırma,
Tez,
Yüksek Lisans.*

Öz

21. yüzyılın en önemli gelişmelerinden biri olan nesnelerin interneti(intenet of things-IoT) ile her geçen daha çok nesnenin internete erişmesi ve günlük yaşamda geniş yer alması bu alandaki akademik alandaki çalışmaların sayısını da her geçen gün arttırmaktadır. Bu çalışmanın amacı; 2017-2021 yılları arasında Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında yapılmış "nesnelerin interneti" konusunda yapılmış olan yüksek lisans tezlerinin incelenmesidir. Bu çalışma betimsel bir özellik göstermektedir ve veri toplama tekniği olarak doküman incelemesi kullanılmıştır. Veri analizi olarak içerik analizi yapılmıştır. YÖK Ulusal Tez Merkezi veri tabanında 90 yüksek lisans tezine ulaşılmıştır çalışma sorularına göre analiz edilmiştir. Araştırma sonucunda akıllı ev, akıllı şehir uygulamaları, sağlık alanında yapılan uygulamalar ve sensör uygulamalarının en çok çalışılan konular olduğu görülmüştür. Çalışma sonuçlarının araştırma yapacak araştırmacılara rehberlik edeceği düşünülmektedir.

INVESTIGATION OF MASTER'S THESIS WRITTEN IN THE FIELD OF THE INTERNET OF THINGS (IOT) IN TURKEY-A META-ANALYSIS STUDY

Keywords

*Internet of Things,
Scientific Research,
Thesis,
Master's.*

Abstract

With IoT, which is one of the most important developments of the 21st century, more and more objects access the internet and take a wide place in daily life, increasing the number of academic studies in this field day by day. The aim of this study is; It is the examination of the master theses on the "internet of things" between 2017-2021 in the Department of Computer Engineering. This study shows a descriptive feature and document analysis was used as a data collection technique. Content analysis was performed as data analysis. In the database of YOK National Thesis Center, 90 master's theses were reached and analyzed according to study questions. As a result of the research, it was seen that smart home, smart city applications, applications in the field of health and sensor applications were the most studied subjects. It is thought that the results of the study will guide the researchers who will conduct research.

Alıntı / Cite

Alkan, A., Kırbaş, İ., (2022). Türkiye'de Nesnelerin İnterneti (IoT) Alanında Yazılmış Yüksek Lisans Tezlerinin İncelenmesi-Bir Meta Analiz Çalışması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 318-327.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Alkan, 0000-0002-9125-1408

İ. Kırbaş, 0000-0002-1206-8294

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 21.06.2021

Revizyon Tarihi / Revision Date 31.08.2021

Kabul Tarihi / Accepted Date 02.10.2021

Yayın Tarihi / Published Date 23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Bilim ve Teknolojideki hızlı ilerleme Endüstri 4.0 ile birlikte Nesnelerin İnterneti (Internet of Things- IoT) kavramını gündeme getirmiştir. Nesnelerin İnterneti (IOT) terimi ilk kez 1999 yılında Procter&Gamble şirketi

* İlgili yazar / Corresponding author: ayse.alkan55@gmail.com

için hazırlanan sunumda Britanyalı bilim insanı Kevin Ashton tarafından kullanılmıştır (Ashton,2009). 1991 yılında Cambridge Üniversitesi'ndeki bir grup akademisyen tarafından geliştirilen kameralı bir sistem ile kahve makinesinin görüntülerinin internet üzerinden paylaşılması ilk uygulama olmuştur (Armentia ve diğ., 2012). "Her şeyin İnterneti" olarak da ifade edilen Nesnelerin İnterneti (IoT) internet üzerinden cihazlar veya sistemler arasında veri alışverişi yapan "nesneler" ağını ifade etmektedir. Bu ağ, günlük hayatımızda kullandığımız çeşitli cihazlardan elde edilen milyarlarca veriyi kullanıp bilgiye dönüştürmektedir (Gubbi ve diğ.,2013) IOT'nin verileri doğru bir şekilde işleyebilmesi ve elde edilen sonuçları insanların yaşamını kolaylaştırmak için kullanabilmesi ana amacıdır (Banger, 2017; Shanthamallu ve diğ.,2017). Nesnelerin interneti akıllı ev, akıllı şehir, bilimsel çalışma, bilişim sektörü, enerji, günlük kullanım, güvenlik, üretim, inşaat, sağlık, tarım, taşımacılık, ticaret uygulamaları gibi pek çok alanda zaman ve maddi konularda imkanlar sunması sebebi ile önemli bir unsur haline getirmektedir.

Standart iletişim protokolleri üzerine kurulu ve adreslenebilme özelliğine sahip nesnelerin, internet aracılığı ile haberleşebilmesi olarak tanımladıkları IOT "İnsandan - İnsana İletişim", "İnsandan - Nesneye İletişim", "Nesneden - Nesneye İletişim" gibi farklı iletişim modları şeklinde uygulanabilmektedir (Bassi ve Horn ,2008). IOT farklı alanlarda ortak bir amaca ulaşmak için iletişim kuran, verileri paylaşabilen birbirine bağlı nesneler, hizmetler, insanlar ve cihazlardan oluşmaktadır. IOT ile fiziksel ortamlardan gelen sensör veriler yapılan değerlendirmelerin ardından bilgi olarak operatörlere veya ilgili kişilere iletilmekte veya verinin sistemler yardımıyla işlenmesi şeklinde olmaktadır (Oral ve Çakır, 2017). Nesnelerin İnterneti ile verinin insan tarafından girişine gerek olmamakta cihazlar aralarında veri toplayabilmekte, iletişim kurabilmekte ve toplanan veriler ile karar verebilmektedir (Aktaş, Çeken ve Erdemli,2014). Çevreden bu ham verilerin alınıp işlenmesi süreci IOT mimarisinde katmanlar yapısı ile bahsedilmektedir. Gökrem, L. ve Bozuklu, M. (2016) tarafından şekil 1'de gösterilen nesnelerin interneti katmanlarına göre; Nesnelerin interneti çekirdeği fiziksel büyüklüklerin bulunduğu ortamı ifade ederken cihaz katmanında veriler algılanarak analog veya sayısal sinyallere dönüştürülmekte ve iletişim protokolleriyle bilinç olarak adlandırılan veri işleme merkezine gönderilmektedir.



Şekil 1. Nesnelerin interneti katmanları (Internet of things layers)

Alanyazında ham verilerin alınıp işlenmesi konusunda pek çok çalışma bulunmaktadır. Örneğin;Baysal ve diğ. (2018) yapmış oldukları çalışmada tasarlanan sistemde seradan kablosuz algılayıcılarla alınan sıcaklık ve nem değerleri, toprak nemi, hava kalitesi ve ışık değerleri kayıt edilerek grafiksel olarak takip edilebilmekte ve algılayıcılar ile alınan veriler sınır değerlerinin dışına çıktığında kullanıcıya e-posta ve kısa mesaj ile bilgilendirme yapılabilmektedir. Uçar ve Uludağ (2018) da araştırmalarında nesnelerin İnterneti altyapısını kullanarak öğrenci takibini ve yoklamasını kontrol eden ve sınıfın kapı ve ışıklarının kontrolünü yapan "Akıllı Sınıf (AS)" ve "Öğrenci Takip Sistemi (ÖTS)" tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Babayiğit ve Büyükpatpat (2019) ise geliştirmiş oldukları sistemde Ultraviyole(UV), yağmur, toprak nem ve sıcaklık sensörü yardımıyla çevresel veriler toplanmakta Wi-Fi modülü kullanarak bu veriler buluta gönderilmektedir. Bu veriler Thingspeak aracılığı ile takip edilebilmektedir. Park ve Park (2011) seradaki bitkilerin ve yaprakların üzerinde çif sebebi ile olabilecek mantar ve bakteriden kaynaklanan hastalıkları önlemek için kablosuz algılayıcı ile kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Arslan ve Kırbaş (2016) mikrodenetleyici tabanlı kablosuz bir ölçüm ve kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistem kablosuz düğümler vasıtasıyla internete erişilebilen herhangi bir yerden bilgisayar, telefon, tablet vb. internete bağlanabilen mobil cihazları ile gerçek zamanlı takip ve uzaktan erişim fırsatı sunmaktadır. Sazak ve Albayrak (2017) internete bağlanabilen bir kablosuz erişim noktasının bulunduğu herhangi bir noktadaki sıcaklık ve nem değerlerini toplayarak, bu değerleri uzak bir sunucuya (ThingSpeak) aktarabilen, bu bilgileri Twitterda paylaşabilen ve kritik değerleri mobil cihazlara bildirim olarak gönderebilen bir sistem tasarlamışlardır. Jisha, Jyothindranath ve Kumary (2017) kablosuz haberleşme sistemlerini kullanabilen ve birçok hizmet sağlayabilen okul servisi izleme sistemi geliştirmişlerdir. Ersin, Yaz ve Karhan (2019) askerin anlık nabız sayısı askeri birime anlık olarak gönderilecek ve askerin durumu hakkında bilgi sahibi olacakları sistem tasarlamıştır. Ayrıca bu sistemde askerin bulunduğu ortamın sıcaklık, nem ve konum verileri askeri birime internet aracılığı ile gönderilmektedir. Küçük, Çelik ve Bayılmış (2018) da servis araçlarının ve öğrencilerin hareketlerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlayan sistem tasarlamışlardır.

Araştırmanın Önemi (Importance of research)

Günlük yaşamda geniş yer alan IOT uygulamalarının 2025 yılına gelindiğinde 75 milyar cihaza çıkması tahmin edilmektedir (Evans, 2011). Bu hızlı artış akademik çalışmaların da bu alanda ivme kazanmasını sağlamıştır. Yapılan çalışmalara kaynak oluşturması ve çalışılan alanları incelemek amacıyla önceden yapılmış tez çalışmalarının analizinin yapılmasının bu konuda çalışacak araştırmacılara yol gösterici olacağı öngörülmektedir.

Araştırmanın Amacı (Purpose of the research)

Bu çalışmanın amacı; Nesnelerin İnterneti (IOT) ile ilgili yüksek lisans tezlerinin incelenmesidir. Çalışmada belirtilen amaca bağlı olarak ilgili tezlerde aşağıdaki sorulara yanıt aranmıştır:

- 1- Tezlerin Yıllara Göre Dağılımı Nasıldır?
- 2- Tezlerin Üniversitelere Göre Dağılımları Nasıldır?
- 3- Tezlerin Yazıldığı Dil'e göre Dağılımı Nasıldır?
- 4- Tezlerin Yürütücüsü olan Danışmanların Unvanlarına Göre Dağılımı Nasıldır?
- 5- Tezlerde Yıllara Göre Çalışılan Konuların Dağılımları Nasıldır?

2. Yöntem (Method)

2.1. Araştırmanın Modeli (Model of the research)

Bu çalışma nitel araştırma deseninde ve tarama modelinde tasarlanmış betimsel özellik gösteren bir meta analiz çalışmasıdır. Yıldırım ve Şimşek (2011) nitel araştırmaları; gözlem, görüşme ve doküman analizi gibi nitel veri toplama tekniklerinin kullanıldığı; olaylara ve olgulara müdahale edilmeden kendi doğal ortamında incelendiği araştırmalar olarak tanımlanmaktadır. Karasar (2012) da tarama modellerini durumu olduğu gibi betimleyen yaklaşımlar olarak ifade etmektedir.

2.2. Verilerin Toplanması (Data collection)

Nitel araştırma deseni ile çalışılan bu araştırmada veri toplama tekniği olarak doküman incelemesi kullanılmıştır. Verilere YÖK Ulusal Tez Merkezi veri tabanı'ndan erişilmiştir. "Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı" nda "nesnelerin interneti" anahtar sözcüğü ile 2017-2021 yılları arasında yapılmış yüksek lisans tezlerine ulaşılmıştır. Bu tarama sonucu 90 yüksek lisans tezine ulaşılmıştır. Veriler araştırmacılar tarafından araştırmanın amaçları doğrultusunda hazırlanan form vasıtasıyla toplanmıştır.

2.3. Verilerin Analizi (Analysis of Data)

Bu araştırmada verilerin analizinde nitel araştırma yaklaşımının analiz yöntemlerinden biri olan içerik analizi kullanılmıştır. İçerik analizlerinde araştırma sorularına göre yönelik sıklık, yoğunluk gibi özellikler belirlenmektedir (Neuman, 2010). İçerik analizi yöntemi ile niceliksel verilere ulaşmak hedeflenmektedir (Çilingir, 2017). Bu çalışmada da araştırma soruları ile ilgili verilere ulaşabilmek ve lisansüstü tezlerin mevcut durumunu belirlemek için içerik analizi tekniği kullanılmıştır. Elde edilen bulgular frekans (f) ve yüzde (%) olarak tablolar halinde sunulmuştur.

3. Bulgular (Results)

Bu bölümde 2017-2021 yılları arasında yapılmış, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nde Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda bulunan "nesnelerin interneti" anahtar kelimesi kapsamında hazırlanan tezlerden elde edilen bulgular frekans ve yüzdeleri verilerek gösterilmiştir.

Tablo1. Yüksek lisans tezlerinin genel özellikleri (General characteristics of master's theses)

		f	%
YIL	2017	4	4.4
	2018	26	28.8
	2019	39	43.3
	2020	19	21.1
	2021	2	2.2
DİL	Türkçe	47	52.2
	İngilizce	43	47.7
Danışman Hocaların Ünvanı	Prof.Dr.	21	23.3
	Doç.Dr.	31	34.4
	Dr.Öğretim Üyesi	37	40.2
	Dr.	1	2.1

Tablo2. Yüksek lisans tezlerinin üniversitelere göre dağılımı (Distribution of master's theses by universities)

Üniversite	f
İstanbul Teknik Üniversitesi	7
Ege Üniversitesi	5
Erciyes Üniversitesi	5
Gazi Üniversitesi	4
Orta Doğu Teknik Üniversitesi	4
Karadeniz Teknik Üniversitesi	4
Fırat Üniversitesi	3
İstanbul Ticaret Üniversitesi	3
Düzce Üniversitesi	3
İstanbul Üniversitesi	2
Dokuz Eylül Üniversitesi	2
Maltepe Üniversitesi	2
Çankaya Üniversitesi	2
Kocaeli Üniversitesi	2
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2
İstanbul Okan Üniversitesi	2
Boğaziçi Üniversitesi	2
Galatasaray Üniversitesi	2
Mersin Üniversitesi	2
Hacettepe Üniversitesi	2
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü	2
Yıldırım Beyazıt Üniversitesi	2
Yaşar Üniversitesi	2
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi	1
Trakya Üniversitesi	1
Gebze Teknik Üniversitesi	1
Koç Üniversitesi	1
Kırkkale Üniversitesi	1
Anadolu Üniversitesi	1
Marmara Üniversitesi	1
Akdeniz Üniversitesi	1
Ankara Üniversitesi	1
Başkent Üniversitesi	1
Kadir Has Üniversitesi	1
Ondokuz Mayıs Üniversitesi	1
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi	1
Eskişehir Teknik Üniversitesi	1
Necmettin Erbakan Üniversitesi	1
İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa	1
Çukurova Üniversitesi	1
Bursa Uludağ Üniversitesi	1
Akdeniz Üniversitesi	1
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi	1
Atatürk Üniversitesi	1
Süleyman Demirel Üniversitesi	1
Işık Üniversitesi	1
İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi	1

2017-2021 yılları arasında yapılan yüksek lisans tezlerinin genel özellikleri Tablo1 de gösterilmektedir. Tablo1 ve Tablo2'deki deki veriler incelendiğinde toplamda 90 yüksek lisans tezine ulaşılmıştır. En fazla tez 2019 yılında yapılmıştır. 47 tez Türkçe, 43 tez de İngilizce yazılmıştır. 37 tezin danışmanlığı "Dr.Öğretim Üyesi" ünvanlı hoca tarafından yürütülmüştür. En fazla tez İstanbul Teknik Üniversitesi'nde ve akabinde Erciyes Üniversitesi ve Ege Üniversitesi'nde yapılmıştır.

3.1. 2017 Yılında Yapılan Tezler (Theses made in 2017)

Dilek (2017) tarafından yapılan çalışmada Arduino MEGA 2560 mikro denetleyici kartı, algılayıcı kalkanı, dört adet hayati bulgular algılayıcısı ile kablosuz iletişimi sağlamak için ESP8266 WiFi modülü kullanılarak kablosuz algılayıcı ağlar ve Nesnelerin İnterneti teknolojilerinden yararlanarak kronik, engelli veya yaşlı hastaların hareket etmelerini engellemeden; solunum, kan basıncı ve nabız gibi hayati bulgularını gerçek zamanlı olarak belirli aralıklarla uzaktan izleme ve acil tıbbî durumlar olduğunda uyarı verilmesini sağlayan 3 katmanlı bir uzaktan hasta takip sistemi önerilmiştir. Barışkan (2017)'in yapmış olduğu araştırmada hazırlanan 19 soruluk genel bilgi anketi ile bireylerin kullanım alışkanlıkları incelenmiş ve ülkemizi korumak için gerekli önlemlerin neler olduğu incelenmiştir. Kılıç (2017)'nin kablosuz duyurga ağları (WSN), nesnelerin interneti ve mobil ağlar için önerdikleri güvenli anahtar aktarım protokolünün değiştirilmiş Diffie-Hellman protokolünden daha hızlı performans gösterdiğini ve tek bir anahtarın taşınması için gereken toplam sürenin anahtar boyutundaki artışla birlikte arttığını belirtmektedir. Mohammed (2017) de tablet veya akıllı telefon ile kontrol edilebilen akıllı ev uygulaması konusunda çalışmış ve akıl ev uygulaması uzaktan yönetilebilmiştir.

3.2. 2018 Yılında Yapılan Tezler (Theses made in 2018)

Güven (2018) nesnelerin interneti cihazlarının maruz kaldığı saldırılar incelenerek bu saldırılara karşı kural tabanlı ve makine öğrenmesi yöntemlerini kullanarak gerçek zamanlı koruma sağlayan uygulama önermiştir. Çetinav (2018) çalışmasında Bluetooth düşük enerji tabanlı nesnelerin internet sistemlerinde güvenlik analizi yapmıştır. Yaşa (2018) alanyazında bulunan nesnelerin interneti uygulama alanlarında geliştirilmiş veri modelleri incelenerek heterojen ortamlardan gelen veriyi temsil eden soyutlama katmanı önerilmiş ve Google bulut platform hizmeti kullanılarak geliştirilen model üzerindeki örnek verileri bulut ortamına aktaracak araç geliştirilmiştir. Sarioğlu (2018) RPL'in çalışma kipleri ve oluşturduğu sorunlar incelenerek sorunların çözümü için hibrit çalışma kipi önerilmiştir. Gültunca (2018) nesnelerin interneti iletişimde kullanılan AMQP, CoAP, MQTT ve XMPP protokollerinin çalışma mantıkları anlatılarak performansları karşılaştırılmıştır. Gülaçar (2018) nesnelerin interneti platformu olan VITAL üzerinde kayıtlı sensörler için kısa ve uzun süreli veri tahmini yapan modül geliştirilmiştir. İbrahimova (2018) alanyazında önceden uygulanmış üç servis kalitesi mekanizmasını (Quality of Service-Qos) 6TiSCH protokolü için uygulayarak bu mekanizmaların performansı incelenmiştir. Yerlikaya (2018) yetkilendirme için önerilen açık yetkilendirme protokolünü (OAuth 2.0) kullanarak yetkilendirme mekanizması üzerinde çalışmıştır ve güvenlik açıklarının başarılı bir şekilde çözüldüğü sonucuna ulaşılmıştır. Aslan (2018) nesnelerin internetinde kullanılan RFID teknolojisi araştırarak mobil teknolojiler ve nesnelerin internetini bir araya getirmiş ve mağazalarda ödeme yaparken yaşanan zorluklara karşı güvenli mobil ödeme sistemi önerilmiştir. Beydemir (2018), özgün bir sıfır ispatı tabanlı yöntem önerilmiştir ve bu yöntem önceki yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Tosun (2018) depo yönetim amacı ile kullanılan standart barkod yapısının alternatifi olan RFID sistemlerle konum belirlemenin kullanımını, verimlilik, finans ve çevresel etkilerini karşılaştırmıştır. Güler (2018) birincil-yedek replikasyon protokolünün yüksek maliyeti gön önüne alınarak performansı yükseltmek için denetim alma yöntemine odaklanmış ve Facebook tarafından açık kaynak olarak geliştirilen RocksDB anahtardeğer veritabanı kullanılmış ve özgün bir sistem önerilmiştir. Taşkesen (2018) yerleşim yerleri dışında bulunan tarım alanlarının kontrolünü sağlamak amacı ile bitki sulama işlemi ve süreç takibinin yapılabildiği akıllı sulama sistemi geliştirilmiştir. Ali (2018) sıcaklık, nem, duman, gaz sensörleri ile tespit edilen nesnelerin interneti tabanlı akıllı yangın izleme sistemi önerilmiştir. Sulman (2018) veri alış-verişi için güç hatları haberleşmesi kullanan akıllı ev sistemi tasarlamıştır. Kantekin (2018) kablosuz algılayıcı ağ düğümleri arasında güvenli haberleşmeyi sağlamak için kullanılan kısıtlayıcı ağ haberleşme protokolü (CoaAP) ve veri bloğu aktarım katmanı güvenliği (DLTS) protokolü birlikte kullanılarak haberleşme modeli güvenli CoAP (CoAPs) tasarlamıştır. Aydın (2018) çalışmasında IETF 6TiSCH protokolünün güvenli önyükleme protokolüne bir eklenti sunulmuştur. Bayrak (2018) Gerçekleştirdiği sistem ile işletmenin farklı şubelerinde personel takibinin yapılmasını sağlamıştır. Tümer (2018) sağlık alanından bel fitiği ve bel kayması teşhisinde kullanılabilecek nesnelerin interneti verilerini seçerek makine öğrenmesi algoritmaları için kullanılan WEKA ile anlık veri işleme için kullanılan Siddhi aracı bir arada kullanılarak akıllı sistem geliştirilmiştir. Aytaç (2018) çalışmasında hızlı servis restoranları için pil ömrü, performans, gecikme, güvenlik, yerinde erişilebilirlik gibi hem yazılım hem de donanımla ilgili iyileştirmeleri nesnelerin interneti mimarisi kurmak için göstermiştir. Ayrıca atık azaltma ve hizmet optimizasyonu için sensör değerleri işlenerek bazı tahminler yapılarak akıllı kararlar verilmiştir. Al-Samarraei (2018) çalışmasında ev güvenlik algılayıcılarını izlemek ve güvenlik için akıllı ev (ev otomasyonu) tasarlamıştır. Karaca (2018) kısa mesafelerde konum tespiti için GPS uydularına ihtiyaç duymadan yapılması

amacıyla çalışmıştır. Alpay (2018) seralarda sıcaklık, bağıl nem, toprak nemi ve ışık gibi çevresel verilerin eş zamanlı izlenebilmesi amacıyla akıllı sera sistemi tasarlanmıştır. Alsaeh (2018) hava durumu, trafik, tıp gibi farklı alanlardan pek çok semantik IOT veri kümesinde paralelleştirilmiş FP-büyüme algoritmasının kullanımı incelenmiştir.

3.3. 2019 Yılında Yapılan Tezler (Theses made in 2019)

Çelebi Şahin (2019) alanyazında bulunan IOT platformu mimari model yaklaşımları incelenerek IOT platformunda olması gereken katmanlar belirlenmiş ve yalın bir çekirdek mimari geliştirilmiştir. Atalay(2019) çalışmasında nesnelerin interneti iskeletlerinde kimlik doğrulama ve veri giriş kontrolü mekanizmaları üzerine çalışılarak yapılan analizler sonucunda nesnelerin interneti iskeleti sunulmuştur. Deniz(2019) yapılmış olan çalışmalardan da faydalanarak güvenlik yöntemi için açıklara karşı olması gereken önlemler belirlenmiştir. Şimşek (2019) nesnelerin interneti kapsamında görsel algılama problemlerine yönelik kenar bilişim tabanlı çözümler üzerinde çalışmıştır. Aslan(2019) akıllı cihazlardan buluta gönderilen ve buluttan alınan veriler için güvenli olarak gönderilen yerden çıkıp gerektiğinde ulaşılması üzerinde çalışılmıştır. Gülen (2019)'un akıllı şehirlerin farklı uygulama alanlarından biri olan atık yönetimi konusu çalışmasının odağını oluşturmuştur. Ünal(2019) araştırmasında bileşen tabanlı yazılım mühendisliği modelleme aracı olan COSECASE kullanarak bağlayıcılar aracılığı ile heterojen olan IOT sistemlerini modelleyebilmek için çözüm önerisi getirilmiştir. Totuk(2019) sis bilişim ve kompakt yazılım yapısına sahip optimum performans ve maliyet sunabilen özelleştirilmiş tek kartlı bilgisayar tabanlı mikro sunucu platformu tasarlamıştır. Yalçın (2019) çalışmasında nesnelerin interneti ile elde edilen verilerin kimlik doğrulamasını yaparak, IOT'da enerji tasarrufu ve tek bir kriptografik yapıda toplanmasını gerçekleştirmiştir. Gürkan(2019) güvenli mesajlaşma amacıyla DTLS ile CoAP kullanan nesnelerin interneti araçları için güvenlik uzantısı geliştirmiştir. Karataş (2019) güvenliğin sağlanması konusunda güncel çalışmalara yer vermiş yırca eliptik eğri kriptolojisi kullanarak verilerin güvenli olarak internet ortamına açılması gerçekleştirilerek diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Kaymaz (2019) acil durumda afet bölgesindeki Wi-fi, Bluetooth/BLE teknolojilerine ek olarak 1GHz altındaki radyo frekansları ile haberleşebilen IOT cihazlarını algılayarak tanımlayabilen ayrıca sunan mobil cihaza ait prototip sunulmuştur. Altun(2019) kısıtlı cihazlar üzerinde blockchain ağı kullanılarak iletişim gizliliğini sağlayan uygulama geliştirilmiştir. Tursun (2019) Hipertansiyon hastalığı için giyilebilir tansiyon aleti tasarlayarak hastalığın teşhisinin yapılması ve nesnelerin interneti ile haberleşmesi sağlanmıştır. Akkurt (2019) IOT temelli akıllı şehir uygulaması geliştirmiştir. Bu uygulamada hareket halindeki araçların takibi, ortamdaki kişi yoğunluğu ve su kaynaklarının verimli kullanılması senaryoları üzerinde çalışılmıştır. Moustapha (2019) tıp merkezlerinden uzakta yaşayanların sağlıkla ilgili problemleri çözmek için önerilerde bulunulmuştur. Miandoab (2019) kablosuz algılayıcı ağlar (KAA) ve nesnelerin interneti aygıtları gibi özerk sistemler için Framework tanımlamıştır. Hilal Hilal(2019) sürücülerin uygun park yeri bulma konusunda çalışmıştır. İncereis(2019) uzaktan program yükleme hizmeti tasarlamıştır. Karadeniz(2019) benzetim tabanlı bir optimizasyon geliştirilmiş ve LoRa ağ geçidi yerleşimi için birden fazla algoritma önerilmiştir. Baş(2019) derin öğrenme metotları ile zaman serisi analizi yaparak bileşenlerin kalan ömürlerini bulmak amacıyla çalışmıştır. Tüfek (2019) çalışmasında akıllı saatler kullanarak kimlik tespiti üzerine çalışmış ve makine öğrenmesinden derin öğrenmeye kadar pek çok alana değinilmiştir. Tok (2019) botnetin öncüsü olan Mirai zararlı yazılımın kaynak kod analizi yapılarak saldırı, enfeksiyon ve komuta-kontrol mekanizmaları açıklanmıştır. Yatağan(2019) Lorawan ağları için yayılma faktörü atamasını iyileştirmek için yapılmış çalışmalar ve güncel durum incelenmiştir. Başbuğ (2019) sayısal ses kayıtlarından anlamsal bilgi çıkarımı ve bu bilgilerin kullanımı ile ses kayıtlarının geri getirilmesi problemleri incelenmiştir. Çakır (2019) gözetimli ve gözetimsiz derin öğrenme algoritmalarının sıfırıncı gün saldırılarını belirlemedeki etkinliğini analiz etmiştir. Karakaya(2019) cihazları ayrı ayrı konfigürasyon yapmak yerine merkezi olarak programlanabilir bir yapı önermiştir. Gürcan(2019) Sığırın sağlığını etkileyen işkembe sağlığı için benzer çalışmalara göre daha uzun süre çalışan ve daha doğru aralıklarla ölçüm yapan bir sistem geliştirilmiştir. Yamaç(2019) 5G'de bulut radyo erişim ağları ile radyo erişim teknolojisini dinamik olarak yapılandırmak için çözüm önerisinde bulunmuştur. Al-Bayati(2019) zaman serilerinde olay işleme ve makine öğrenmesinin önemi üzerinde çalışmıştır. Ayaz(2019) platformdan bağımsız ağ istemcileri arasında geröek zamanlı iletişim kurmak içinmetin tabanlı ve JSON sözdizimli JTP isminde yeni bir protokol önermiştir. Yılmaz(2019) kullanıcının kullanmakta olduğu cihazlar için kurallar oluşturabildiği, cihazlardan gelen verilerin bu kurallar ile değerlendirildiği ve ihtiyaç duyulduğunda aksiyon alınabilen bir yazılım geliştirilmiştir. Demirci(2019) bir yerde insan gözüne ihtiyaç duymadan denetlenmesi amacıyla Raspberry Pi 3'e takılan kamera ve sensörler ile verileri alıp, değerlendirip sonuçları eş zamanlı istemciye gönderen donanım ve yazılım sistemi gerçekleştirilmiştir. Balcı (2019) Raspberry Pi ile uzaktan bir ortamı izleme sistemi tasarlamıştır. Konacaklı(2019) blokzinciri sistemini ele alarak bu alandaki çalışmaların güvenlik konusundaki yaklaşımları, bu yaklaşımlarla siber güvenlik için geliştirebileceği çözümleri analiz etmiştir. Boumaiza (2019) IETF 6TİSCH kimlik doğrulama mekanizmasının iletişim yükünü en aza indirmek, verimli bir kimlik doğrulama işlemini yapabilmek ve IOT ağıının enerji verimliliğini arttırmak konusunda çalışmıştır.

3.4. 2020 Yılında Yapılan Tezler (Theses made in 2020)

Şeker(2020) nesnelerin interneti teknolojisi ile geliştirdiği mobil e-vizite uygulamasıyla sağlık alanına katkı sağlamıştır. Uysal(2020) çalışmasında kendi tasarladığı web sitesi, Mozilla Webthings ve Virtuino olarak üç farklı teknoloji kullanarak park sorununa çözüm getirmeye çalışmıştır. Sattuf(2020) 6LoWPAN-tabanlı çok amaçlı sensör izleme sistemi, CC2650 SensörTag gibi donanım cihazları kullanılarak web arayüzü ile görselleştirdiği çalışmasının gerçek hayatta kullanım önerilerinde bulunulmuştur. Kuriş(2020) akıllı cihazların güvenliği için bu cihazlara yönelik siber saldırıların tespit edilmesini sağlayabilecek yapay zeka uygulamaları ile saldırı tespit sistemi geliştirmiştir. Polat (2020) çalışması ile akıllı şehir konusundaki fikirlerin hayata geçirilmesinde rehber olmak istemiştir. Söyü (2020) uygulama katmanındaki tıkanıklık kontrolünü yapmak amacıyla yazılan protokollerin (CoAp, Default CC vs.) farklı katmanlardaki farklı protokollerle olan kombinasyonların performans analizi üzerine çalışılmıştır. Zameel (2020) IOT ağlarında önbellekleme gereksinimini proaktif öğrenen, isabet oranını iyileştirmek için önbellek verilerini değiştiren yeni bir önbellekleme yakışımı geliştirmiştir. Kalkışım(2020) nesnelerin interneti teknolojileri ile toprak, nem, hava oransal nem, sıcaklık, karbondioksit verileri ölçülerek internet erişimi ile görüntülenebilecek web uygulaması geliştirmiştir. Canbalaban (2020) çalışmasında RPL'ye yönelik saldırıları incelemiştir. Güven (2020) Raspberry Pi(RPi), Arduino ve çeşitli sensörlerin kullanımı ile akıllı ev sistemi geliştirilmiştir. Mülayim (2020) TaskDSL dilini kullanarak uygulama geliştirmesini ve hataların ayıklanmasını sağlayan Taskify aracı tasarlamıştır. Thera, (2020) öğrencilerin IOT sistemleri simüle edebileceği, oluşturabileceği, yönetebileceği bir IOT simülasyon aracı üzerine çalışmıştır. Türk (2020) kablosuz elektronik stetoskop için gürültü önleyici özelliği bulunan bağırsak aktivitesi tespit algoritması geliştirmiştir. Kalyoncu (2020) "Akıllı Ev" sisteminin bir ögesi olarak düşünülebilecek kapı kontrol IOT uygulaması tasarlamıştır. Kanyılmaz (2020) sis bilişim mimarisi hazırlanarak akıllı ev örneği uygulanmıştır.

3.5. 2021 Yılında Yapılan Tezler (Theses made in 2021)

Aba (2020) nesnelerin interneti çözümlerinde kullanılan düşük enerji, kaynak ve maliyete sahip uç cihazların grup tabanlı kimlik doğrulama ve yetkilendirilmesi amacıyla kullanılan en uygun yöntemin belirlemek için IOT KETI Mobius platformu temel alınarak geliştirilen yapı ile uç birimler üzerindeki hesaplama yükü ve sinyal trafiğinin azaltılmasını sağlamıştır. Othman (2021) çalışmasında yüz ifadeleri kullanılarak otomatik hasta değerlendirilmesi amacıyla giyilebilir bir çözüm önermektedir.

4. Sonuç, Tartışma ve Öneriler (Result, Discussion and Recommendations)

Bilimsel araştırmalara destek olmak amacı ile bu çalışmada 2017-2021 yılları arasında Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında "nesnelerin interneti" anahtar sözcüğü ile yazılmış yüksek lisans tezleri incelenmiştir. 90 yüksek lisans tezine YÖK'ün Ulusal Tez Merkezi veri tabanı 'ndan erişilmiştir. Tarama modelinde tasarlanan çalışmanın veri analizinde içerik analizi ile nicel verilere ulaşılmıştır. En fazla tez 2019 yılında yapılmış ve bu tezlerden 47 tanesi Türkçe, 43 tanesi de İngilizce yazılmıştır. 37 tezin danışmanlığı "Dr.Öğretim Üyesi" ünvanlı hoca tarafından yürütülmüştür. En fazla tez İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yazılmıştır. Tezlerin yıllara göre çalışılan konuların dağılımları incelendiğinde konu dağılımlarında farklılıklar olduğu söylenebilir. Araştırmacılar tarafından en çok tercih edilen konuların ise akıllı ev, akıllı şehir uygulamaları, sağlık alanında yapılan uygulamalar ve sensör uygulamaları olduğu söylenebilir. Ayrıca nesnelerin interneti konu alanında kullanılan cihazların siber güvenliğinin ilgi çeken bir konu olduğu, farklı platformlar arasında yapılmış olan karşılaştırmaların yeni çalışmalara rehberlik yapacağı söylenebilir. Yapılmış çalışmalar incelendiğinde eğitim alanında bu konuda yapılacak çalışmaların farklılık ve yenilik getireceği söylenebilir. Yeni araştırma yapacak araştırmacıların yapılmış olan çalışmaları dikkate alarak farklı alanlarda çalışmaları alanyazında çeşitliliği arttıracak ve aynı çalışmaların tekrar yapılmaması konusunda yol gösterici olacaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Aba, İ.U.(2020), Grup Tabanlı Kimlik Doğrulama Yöntemlerinin Nesnelerin İnterneti Standartlarında Uygulanması, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale.
- Aslan, K.(2019), Bulut Bilişimi İle Nesnelerin İnternetinin Veri Güvenliğinin Bulut Bilişimi Üzerinde Performans Değerlendirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara.
- Akkurt, M.(2019), Nesnelerin İnterneti Uygulamalarının Cupcarbon ile Benzetimi:Akıllı Şehir Örnekleri, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.

- Aktaş, F., Çeken, C. ve Erdemli, Y. E. (2014). Biyomedikal uygulamaları için nesnelerin interneti tabanlı veri toplama ve analiz sistemi. Tıp teknolojileri ulusal kongresi, 25-27.
- Al-Bayati, T.A.(2019), Zaman Serilerinde Anormallik Yakalanması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kadir Has Üniversitesi, İstanbul.
- Alsaeh, A.B.A.(2018), Semantik ve Büyük IOT Verisi Üzerinde Paralel Birliklilik Kuralı Madenciliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çankaya Üniversitesi, Ankara.
- Al-Samarraei, Y.S.H.(2018), Nesnelerin İnterneti ile Akıllı Ev tasarımı (Ev Otomasyonu), Fen Bilimleri Enstitüsü, Çankaya Üniversitesi, Ankara.
- Alpay, Ö.(2018), Sera Uygulamalarında Bulanık Mantık Tabanlı Uzaktan Kontrol Sistemi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ
- Ali, A.O. (2018), Nesnelerin İnterneti Teknolojisine Dayalı Akıllı Yangın Algılama Sistemi Geliştirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Altun, A.(2019), Nesnelerin İnterneti Cihazları İçin Blokzinciri Tabanlı Yetkilendirme Modeli, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Armentia, J., C.-Mansilla, D., Ipiña, D. L. (2012). Fighting against Vampire Appliances through Eco-aware Things. Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services, Ubiquitous Computing.
- Arslan, K., ve Kırbas, İ. (2016). Nesnelerin İnterneti Uygulamaları İçin Algılayıcı/Eyleyici Kablosuz Düğüm İlkörneği Geliştirme. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7(Özel (Special) 1), 35-43.
- Ashton, K. (2009). That 'internet of things' thing. RFID Journal, 22(7), 97-114.
- Aslan, O.(2018), Nesnelerin İnterneti Kapsamında Mağazalar İçin Akıllı ve Güvenli Ödeme Sistemlerinin Geliştirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Atalay, M.(2019), Nesnelerin İnterneti Üzerine Giriş Kontrol ve Kimlik Onaylama Mekanizmaları Üzerine Bir Çalışma, Fen Bilimleri Enstitüsü, Akdeniz Üniversitesi, Antalya.
- Ayaz, S.(2019), Json Sözdizimli Gerçek Zamanlı İletişim Protokolü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Okan Üniversitesi, İstanbul.
- Aydın, H.(2018), IETF 6TiSCH Protokolü için Dağıtık Kullanıcı Kimlik Doğrulama Mekanizması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Aytaç, K.(2018), Hızlı Servis Restoranlarında Nesnelerin İnterneti Tabanlı Atık ve Hizmet Yönetimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Babayiğit, B. ve Büyükpatpat (2019), B. Nesnelerin İnterneti Tabanlı Sulama ve Uzaktan İzleme Sisteminin Tasarımı ve Gerçekleştirimi. Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi, 12(2), 13-19.
- Balci, M.(2019), Raspberry Pi Mini Bilgisayarı ile Ortam İzleme Sistemi Geliştirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şeyh Edebali Üniversitesi, Balıkesir.
- Banger, G. (2017). Endüstri 4.0 Ekstra (1.Baskı), Ankara: Dorlion Yayıncılık.
- Barışkan, M.A(2017), Türkiye'deki Siber Güvenlik Bilinci ve Sosyal Mühendislik Ataklarına Karşı Savunma Önlemlerinin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.
- Bassi, A. ve Horn, G. (2008). Internet of Things in 2020: A Roadmap for the Future. European Commission: Information Society and Media, 22, 97-114.
- Baş, C.N.(2019), Endüstri 4.0 İçin Derin Öğrenme Yaklaşımlarıyla Zaman Serisi Analizi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Galatasaray Üniversitesi, İstanbul.
- Başbuğ, A.M.(2019), Ses Olayı Tanıma ve Akustik Sahne Geri Getirimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Başkent Üniversitesi, Ankara.
- Bayrak, M.Z.(2018), Bulut Tabanlı Personel Devam Kontrol Tasarım ve gerçekleşmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Baysal, K., Özcan, M. O., Özdüven, F. F. ve Beynek, B. (2018). Nesnelerin İnterneti Tabanlı Bir Sera Takip Sistemi. Ejavoc (Electronic Journal of Vocational Colleges), 8(2), 49-56.
- Beydemir, A.(2018), Sıfır Bilgi İspatı Tabanlı Kimlik Doğrulama, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze Teknik Üniversitesi.
- Boumaiza, Y.(2019), IOT'de Kimlik Doğrulama:6TiSCH Güvenli Anahtar Teslimi İçin Dağıtılmış Depolama Kullanarak, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Üniversitesi, Trabzon.
- Canbalaban, E.(2020), RPL Tabanlı Nesnelerin İnterneti Katmanlar Arası Saldırı Tespit Sistemi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Çakır,B.(2019), Derin Öğrenmeyle Sıfırinci Gün Saldırı Tespiti, Fen Bilimleri Enstitüsü, ODTÜ, Ankara.
- Çelebi Şahin, G.(2019),Yalın Bir Nesnelerin İnterneti Platformu Geliştirimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Çetinav, I.(2018), Nesnelerin İnterneti Uygulamalarında AES blok Şifresinin Yazılımsal ve Donanımsal Performanslarının Karşılaştırılması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya Üniversitesi.
- Çilingir, A. (2017). İletişim alanında içerik analizi yöntemi kullanılarak yapılan yüksek lisans ve doktora tezleri üzerine bir inceleme. Erciyes İletişim Dergisi, 5(1), 148-160.
- Deniz, E.(2019), Nesnelerin İnternetinde Gizlilik ve Güvenlik Yöntemi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Demirci, O.(2019), Makineler Arası İletişim İle Kimlik Tespiti ve Uyarı Alarmlarının Üretilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun.
- Dilek, S.(2017), Nesnelerin İnterneti Tabanlı Uzaktan Sağlık İzleme Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi.
- Ersin, Ç., Yaz, M. ve Karhan, M. (2019). Savunma Sanayi İçin Örnek Bir IoT Uygulaması. Electronic Letters on Science and Engineering, 15(3), 66-73.
- Evans, D.(2011). The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything. CISCO white paper 1.2011 (2011): 1-11.
- Gökrem, L. ve Bozuklu, M. (2016). Nesnelerin interneti: Yapılan çalışmalar ve ülkemizdeki mevcut durum. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, (13), 47-68.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. and Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, Future generation computer systems, vol. 29, no. 7, pp.1645-1660, 2013. Article (CrossRef Link).

- Gülaçar, H.(2018), Nesnelerin İnterneti Platformları İçin Makine Öğrenmesi Tabanlı Tahmin Modülü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Gülen, D.(2019), Akıllı Atık Yönetim Teknikleri ve Farklı Senaryolardaki Başarımlar, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Güler, B.(2018), Birincil-Yedek Replikasyonu İçin Yük-Bilinçli Sıkıştırılmış Artımlı Denetim Noktası Alma Yöntemi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Koç Üniversitesi, İstanbul.
- Gültunca, C.(2018), Nesnelerin İnternetinde Uygulama Katmanı Üzerindeki Haberleşme Protokollerinin İncelenmesi ve Deneysel Karşılaştırılması, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul.
- Gürcan,F.(2019), Büyükbaş Hayvanlarda İşkembe Sağlık Durumu İzleme Sisteme Prototipinin Geliştirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Gürkan, A.T.(2019), Nesnelerin İnterneti Uygulamaları İçin CoAP ve DTLS protokollerinin analizi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Işık Üniversitesi, İstanbul.
- Güven, C.T.(2020), Yapay Zeka Yöntemleri Kullanılarak Akıllı Ev Sistemi Geliştirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin Üniversitesi, Mersin.
- Güven, E.Y.(2018), Kenar Bilişim İçin Siber Saldırıları Tespit ve Önleme Yöntemleri, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi.
- Hilal Hilal, A.A.(2019), Nesnelerin İnterneti Tabanlı Akıllı Park Sistemi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- İbrahimova, D.(2018), IETF 6TiSH Protokolünde Hizmet Kalitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- İncereis, N.(2019), Bir Uzaktan Program Yükleme Hizmeti Tasarımı ve Uygulaması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Okan Üniversitesi, İstanbul.
- Jisha, R. C., Jyothindranath, A. ve Kumary, L. S. (2017), September). Iot based school bus tracking and arrival time prediction. In 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI) (pp. 509-514). IEEE.
- Karaca, K.N.(2018), Konum Tespitinde Yol Kaybı Modellerinin Performans Analizi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Karasar, N. (2012). Bilimsel araştırma yöntemi. Ankara: Nobel.
- Kalkışım, A.E.(2020), Nesnelerin İnterneti Kullanarak Sera Uygulamalarının Geliştirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce
- Kalyoncu, A.(2020), IOT Tekolojisini Kullanan Pratik ve Güvenilir Akıllı Kapı Kilidi Tasarımı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul.
- Kantekin, U. (2018), Nesnelerin İnternetinde Coap protokolü ile Kablosuz Algılayıcı Ağların Güvenliğinin Sağlanması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maltepe Üniversitesi, İstanbul.
- Kanyılmaz, A.(2020), Nesnelerin İnterneti İçin Sis Hesaplama Mimarisi: Bir Akıllı Ev Uygulaması Örneği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Karadeniz, G.(2019), Akıllı Şehir Senaryoları İçin Benzetim Tabanlı Lora Baz İstasyonu Konumlandırma Optimizasyonu, Fen Bilimleri Enstitüsü, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Karakaya, S.(2019), Linux Tabanlı ve Arayüz Destekli Mikro Bilgisayar İle Switch Cihazı Tasarımı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Karataş, İ.(2019), Eliptik Eğri Şifrelemenin Kısıtlanmalı Ağlarda İletim Katmanındaki DTLS Protokolünde Doğrulama ve Anahtar Karşılaştırma Aşamasında Kullanılması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maltepe Üniversitesi, İstanbul.
- Kaymaz, B.(2019), Nesnelerin İnterneti Cihazlarının Acil Durumlarda Yönetimi İçin Konsept Dizayn, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yaşar Üniversitesi, İzmir.
- Kılıç, A.(2017), Revisiting Shamir's no-key protocol:A lightweight key transport protocol, Yüksek Lisans Tezi Fen Bilimleri Enstitüsü, ODTÜ.
- Konacaklı, E.(2019), Ulusal Güvenlik İçin Blokszinciri Tabanlı Siber Güvenlik Modeli, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir.
- Kuriş, U.(2020), Nesnelerin İnterneti Ekosisteminde Yapay Zeka Tabanlı Saldırı Tespit Sistemi Geliştirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa, İstanbul.
- Küçük, K., Çelik, B. ve Bayılmış, C. (2018). Nesnelerin İnterneti Teknolojileri ile Gerçek Zamanlı Okul Servisi ve Öğrenci Takip Sistemi Tasarımı. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(4), 1211-1223.
- Miandoab, S.N.(2019), Durum Makinaları ile KAA ve IOT Temelli Uygulamalar İçin Bir Framework Tasarımı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, İstanbul.
- Mohammed Mohammed, I.A.(2017), Implementation of a smart house application using wireless sensor Networks, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi.
- Moustapha, M.(2019),Nesnelerin İnternetine Dayanan Akıllı Sağlık Bakım Sistemi Geliştirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Mülayim, M.(2020), Kesikli Güçle Çalışan Cihazlar İçin ve Hatasız Program Geliştirme, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Neuman, W. L. (2010, çev. Özge, S). Toplumsal araştırma yöntemleri: Nitel ve nicel yaklaşımlar. Yayın Odası Yayınları.
- Oral, O. ve Çakır. M., (2017), "Nesnelerin İnterneti Kavramı Ve Örnek Bir Prototipin Oluşturulması", 4. Ulusal Meslek Yüksekokulları Sosyal Ve Teknik Bilimler Kongresi Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, 11-13 Mayıs, Burdur.
- Othman, M.A.(2021), EGM Sinyalleri Kullanarak Nesnelerin İnterneti Tabanlı Akıllı Yüz İfadesi İzleme, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Park, D.H., Park, J.W. (2011). Wireless Sensor Network-Based Greenhouse Environment Monitoring and Automatic Control System for Dew Condensation Prevention, Sensors, 11, 3640-3651
- Polat, L.(2020), Akıllı Şehir Teknolojilerinin İncelenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Sarioğlu, M.(2018), RPL Ağları İçin Hibrit Bir Çalışma Kipi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- Sattuf,H.(2020), 6LoWPAN Tabanlı Çok Amaçlı Sensör İzleme ve Bildirim Sistemi Geliştirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Sazak, T. ve Albayrak, Y. (2017). Nesnelerin İnterneti (IoT) Üzerine Ortam Verilerini Toplayan ve Uzaktan Takibini Sağlayan Bir Sistem Tasarımı. 19. Akademik Bilişim Konferansı, Aksaray, Türkiye.
- Shanthamallu, U. S., Spanias, A., Tepedelenlioglu, C., ve Stanley, M. (2017). A brief survey of machine learning methods and their sensor and IoT applications. In 2017 8th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA) (pp. 1-8). IEEE.
- Söyü, R.(2020),Nesnelerin İnterneti Ağlarında Tıkanıklık Yöntemlerinin Performans Analizi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Sulman, K.A.(2018), Güç Şebekeleri Aracıyla Akıllı Cihazların Uzaktan Yönetimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Şeker, Ü.(2019),Nesnelerin İnterneti Yöntemiyle E-vizite Uygulaması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya
- Şimşek, E.(2019), Nesnelerin İnterneti İçin Kenar Bilişim Tabanlı Akıllı Görsel Algılama Analizi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Taşkesen, M. (2018), Wi-Fi ve Nesnelerin İnterneti Teknolojileri Kullanılarak Güncel Hava Durumu Verileri ile Tarla Sulama Sisteminin Gerçekleştirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Tosun, H.C. (2018), Konuma Bağlı Depo Yönetim Sistemlerinde RFID ve Barkod Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul.
- Tok, M.S.(2019), Nesnelerin İnternetinde Botnetler:Mirai Zararlı Yazılımı Üzerine Bir Çalışma, Fen Bilimleri Enstitüsü, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara.
- Totuk, Z.B.(2019),Kapalı Alanda İzleme ve Kontrol İçin Özelleştirilmiş Bir Mikro Sunucu Platformunun Tasarlanması ve Uygulanması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yaşar Üniversitesi, İzmir.
- Thera, D.(2020), Cisco Paket İzleyici Kullanarak Nesnelerin İnterneti Simülasyonu, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İzmir İleri Teknoloji Üniversitesi, İzmir.
- Tursun, G.(2019),Nesnelerin İnterneti ve Bulanık Mantık Kullanarak Giyilebilir Tıbbi Cihazlarda Hipertansiyon Teşhisi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi.
- Tüfek, N.(2019), Derin Öğrenme Yöntemleri İle Sensör Tabanlı Sistemlerde Aktivite ve Kimlik Tanıma, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Tümer,E.D.(2018), Nesnelerin İnterneti Ortamındaki Veriler Kullanılarak Makine Öğrenmesi Algoritmaları Tahminleme ve Gerçek Zamanlı Veriler Üzerinde Karmaşık Olay İşleme, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Türk, E.(2020), IOT Cihazları İçin Aktif Gürültü Önleme Özellikli Bağırsak Sesi Tespit Algoritması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Akdeniz Üniversitesi, Antalya.
- Uçar, A ve Uludağ, M. H. (2018). Nesnelerin İnterneti (IoT) ile Akıllı Sınıf ve Öğrenci Takip Sistemi Tasarımı. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 9(2), 591-600.
- Uysal, E.(2020), Mersin Üniversitesi İçin Akıllı Park Sisteminin Tasarımı ve Uygulaması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin Üniversitesi, Mersin.
- Ünal, S.(2019), Bileşen Yönelimli Yazılım Mühendisliğinde Heterojen Nesnelerin İnterneti Sistemlerinin Bağlayıcılar Kullanılarak Modellenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, ODTÜ, Ankara.
- Yalçın, C.(2019), Blok Zincir Mimarisinin Nesnelerin İnternetinde Kullanımı ve Performans Analizi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Yamaç, A.Ö.(2019), 5G Mobil Ağlarda Enerji Verimliliği İçin Radyo Erişim Teknolojisinin Dinamik Olarak Belirlenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, ODTÜ, Ankara.
- Yaşa, A.C.(2018), Nesnelerin İnterneti İçin Bir Veri Gösterim Modeli Geliştirilmesi ve Bulut Platformunda Saklanması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Yatağan, T.(2019), Lorawan'lar İçin Akıllı Yayılma Faktörü Ataması, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Yerlikaya, Ö.(2018), Güvenlik Geliştirilmiş Hafif Mesajlaşma Protokolü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Yıldırım, A. ve Şimşek, H. (2008). Sosyal bilimlerde nitel araştırma yöntemleri. 7. Baskı, Tıpkı Basım. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Yılmaz, S.M.(2019), Nesnelerin İnterneti Cihazları İçin Kural Tabanlı Kontrol Sistemi Geliştirilmesi ve Uygulaması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce.
- Zameel, A.(2020), Kablosuz IOT Ağlarında İçeriğe Duyarlı Önbellekleme, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Üniversitesi, Trabzon.



ÇEKİŞMELİ ÜRETİCİ AĞLAR VE TRANSFER ÖĞRENİMİ KULLANILARAK GÖĞÜS X-RAY GÖRÜNTÜLERİNDEN COVID-19 TESPİTİ ÜZERİNE BİR DERLEME

Meltem KURT PEHLİVANOĞLU*, Uğur Kadir ARABACI

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>COVID-19 Tespiti, Göğüs X-Ray Görüntüleri, Makine Öğrenmesi, Derin Öğrenme, Transfer Öğrenimi.</i>	COVID-19 pandemisi ölümcül salgınlardan biridir. Hastalığın daha fazla yayılmasını azaltmak için yapay zekâya dayalı alternatif test yöntemleri değerlendirilmiştir. Viral bakteriyel zatürre (pnömoni) ile göğüs X-Ray görüntüleri COVID-19 hakkında önemli bilgiler sağlar. Bir yapay zekâ sistemi, radyologların bu göğüs röntgeni görüntülerinden COVID-19'u tespit etmesine yardımcı olabilir. Çekişmeli Üretici Ağlar (Generative Adversarial Networks-GANs) görüntü veri kümesinin genişletilmesi, yüksek çözünürlüklü görüntü elde etme, bir görüntüdeki desenin başka bir görüntüye transfer edilmesi gibi alanlarda kullanılır. Bu çalışmada, literatürde verilen göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden COVID-19 tespiti yapan güncel çalışmalar kapsamlı olarak tartışılmıştır. Ayrıca bu çalışmalarda kullanılan veri kümelerinin özellikleri, GAN ile sentetik görüntülerin üretimi ve transfer öğrenme mimarileri üzerinde durulmuştur. Çalışma, göğüs X-Ray görüntüleri üzerinde COVID-19 tespiti yapan diğer çalışmalar için karşılaştırmalı bir rapor sağlamayı amaçlamaktadır.

A SURVEY ON COVID-19 DETECTION FROM CHEST X-RAY IMAGES USING GENERATIVE ADVERSIAL NETWORKS AND TRANSFER LEARNING

Keywords	Abstract
<i>COVID-19 Detection, Chest X-Ray Images, Machine Learning, Deep Learning, Transfer Learning.</i>	The pandemic related to the COVID-19 is one of the deadly epidemics. To reduce the further spread of the disease the alternative testing methods based on artificial intelligence have been evaluated. The chest X-Ray images with viral bacterial pneumonia provide remarkable information about COVID-19. An artificial intelligence system can help radiologists to detect COVID-19 from these chest X-Ray images. Generative Adversarial Networks (GANs) are used in areas such as expanding the image dataset (image augmentation), obtaining high-resolution images, transferring a pattern from one image to another. In this paper, the current studies which detect COVID-19 from the chest X-Ray images have been comprehensively discussed. Moreover, the properties of the datasets used in these studies, generating synthetic images with GAN and transfer learning approaches have been emphasized. This paper aims to provide a comprehensive report for other studies which detect COVID-19 from the chest X-Ray images.

Alıntı / Cite

Kurt Pehlivanoglu, M., Arabaci, U.K., (2022). Çekişmeli Üretici Ağlar ve Transfer Öğrenimi Kullanılarak Göğüs X-Ray Görüntülerinden COVID-19 Tespiti Üzerine Bir Derleme, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 328-340.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
M. Kurt Pehlivanoglu 0000-0002-7581-9390	Başvuru Tarihi / Submission Date 22.06.2021
U.K. Arabaci, 0000-0002-0633-7304	Revizyon Tarihi / Revision Date 27.09.2021
	Kabul Tarihi / Accepted Date 01.11.2021
	Yayın Tarihi / Published Date 23.03.2022

* İlgili yazar / Corresponding author: meltem.kurt@kocaeli.edu.tr, +90-262-303-3571

1. Giriş (Introduction)

COVID-19 pandemisi tüm dünyayı etkisi altına alan ölümcül salgınlardan biridir. Bu kapsamda literatürde yapılan birçok çalışmada, COVID-19 tespiti amaçlı yapay zekâ yöntemleri kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Geçmiş yıllarda zatürre ve tümör hücrelerinin tespiti amaçlı yapılan birçok çalışma, günümüzde COVID-19 tespiti çalışmalarının öncüsü olmuştur. Küçük veri kümesi ile başarılı sonuçlar elde etmek, eldeki verilerden işe yarar sentetik veriler üretmek, önceden eğitilmiş transfer öğrenme yöntemlerinin eğitim sürecinde kullanılması gibi yöntemler; COVID-19 tespiti amaçlı kullanılarak medikal araştırmalara yardımcı olup aynı zamanda maliyeti de düşürmüştür.

Biyomedikal görüntüler üzerine makine öğrenimi çalışmalarında veri kümesi önemli bir yer tutar. Bu çalışmalarda veri kümesini genişletmek için görüntüyü ters çevirme, renk değişimi gibi basit yöntemler kullanılabilir. GAN modeli (Goodfellow vd., 2014) medikal çalışmalarda veri kümesinin genişletilmesi için kullanılan yöntemlerden birisidir, GAN kullanımı ile gerçekçi veriler üretmek mümkündür. GAN modelleri temelde üretici ve ayrıştırıcı olarak tanımlanmış iki ağ modelinin birbirleri ile etkileşimi ve çekişmesi sayesinde eğitim verisi ile yakın istatistikte yeni veriler üretilmesini sağlar. Üretici ağ başlangıçta rastgele değerler ile bir görüntü üretir. Ayrıştırıcı ağ, üretici ağdan gelen görüntü ile veri kümesindeki görüntüleri kıyaslayıp gelen görüntünün gerçek mi yoksa sahte mi olduğuna karar verir. Bu karardaki kayıp fonksiyonuna göre üretici ağ kendini günceller. Her bir devirden sonra kayıp fonksiyonu kullanılarak geri-yayılma (backpropagation) ile iki model de eğitilir. Başlangıçta rastgele değer ile görüntü üreten üretici ağı, ayrıştırıcı ağdan dönen cevaba göre iyileştirildiği için gerçekçi veriler üretir. COVID-19 tespitinde kullanılacak göğüs X-Ray görüntülerinden gerçekçi sentetik görüntülerin üretilmesi için GAN modelleri kullanılır (Goodfellow vd., 2014).

Önceden eğitilmiş transfer öğrenim mimarilerinin kullanımı, yapay zekânın medikal alandaki çalışmalarında artış göstermektedir (Chowdhury vd., 2020). Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Network-CNN) modeli tabanlı transfer öğrenim mimarisinde öğrenme aktarımı sayesinde görüntüler üzerinde yüksek başarımlarla çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca transfer öğrenimi, küçük veri kümesi ile çalışabilmenin önünü açar. VGG-16 (Simonyan ve Zisserman, 2014), VGG-19 (Szegedy vd., 2016), ResNet (He vd., 2016), EfficientNet-B0 (Tan ve Le, 2019), DenseNet201 (Huang vd., 2017), GoogLeNet (Shah ve Yang, 2015), SqueezeNet (Öksüz vd., 2020), Xception (Jain vd., 2021), Inception v3 (VGG-19, 2021), ShuffleNet (Zhang vd., 2017), MobileNet-v2 (Apostolopoulos vd., 2020), AlexNet (Krizhevsky vd., 2012) gibi CNN modeli tabanlı transfer öğrenim mimarileri ile göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden COVID-19 tespiti gerçekleştirilebilir.

Literatürde göğüs X-Ray görüntülerinden COVID-19 tespiti amaçlı yapay zekâ tabanlı tanı sistemi modellerinin geliştirilmesi önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir. Bu çalışmada literatürde yer alan ve göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden COVID-19 tespitinde, GAN modelleri ile sentetik veri üretimi gerçekleştiren ve transfer öğrenimi yöntemlerini kullanan çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. Kullanılan veri kümeleri, bu veri kümelerinin özellikleri, GAN ile üretilen sentetik veri kümesi ile çalışıldığında başarı oranları durumları detaylandırılmıştır. Bunun yanı sıra özellikle transfer öğrenimi mimarilerinin bu alandaki başarımları araştırılarak, COVID-19 tespiti amaçlı önerilen yöntemlerde kullanılan bu mimariler için elde edilen başarı oranları kapsamlı olarak analiz edilmiştir.

1.1. Motivasyon ve Katkı (Motivation and Contribution)

COVID-19 kapsamında literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, özellikle göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden COVID-19 tespiti yapan birçok çalışmanın ve modelin literatüre kazandırıldığı görülmüştür. Ancak bu çalışmalarda kullanılan veri kümelerinin özetlenmesi, GAN ile üretilen sentetik verilerin ve transfer öğrenimi mimarilerinin kullanımı bakış açısıyla önerilen modellerin ele alınması önemlidir.

Bu kapsamda bu çalışmada göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden COVID-19 tespiti yapan çalışmalar, yukarıda verilen kısıtlar çerçevesinde ele alınarak, bu çalışmalar tartışmalı bir bakış açısıyla verilmiştir. Çalışma bu yönüyle özgün olup, diğer çalışmalar için önemli, yol gösterici bir rapor niteliğindedir.

1.2. Organizasyon (Organization)

Çalışmanın ikinci bölümünde, çalışmalarda COVID-19 tespiti amaçlı kullanılan ve göğüs X-Ray görüntülerini içeren veri kümeleri tespit edilerek, bu veri kümelerinde yer alan bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde ise; sentetik veri kümelerinin kullanımı ve transfer öğrenimi mimarileri ele alınmıştır. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılarak ileriki çalışmalar verilmiştir.

2. Göğüs X-Ray Görüntülerinden COVID-19 Tespiti Amaçlı Kullanılan Veri Kümeleri (Datasets used in COVID-19 Detection from Chest X-Ray Images)

Literatürde COVID-19 tespiti amaçlı kullanılan göğüs X-Ray görüntü veri kümeleri kapsamlı olarak araştırılarak, bu veri kümelerine ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

Cohen/IEEE 8032 Veri Kümesi (Cohen vd., 2020): Çevrimiçi yayınlardan oluşturulmuş bir veri kümesi olup görüntü bilgileri ile cinsiyet, yaş ve vakaların klinik geçmişlerinin de yer aldığı belirli aralıklarla güncellenen bir veri kümesidir. Veri kümesindeki görüntüler COVID-19, zatürre ve sağlıklı olmak üzere üç farklı sınıf olarak etiketlenmiştir.

Brixia-score-COVID-19 (Signoroni vd., 2020): 4703 COVID-19 hastasının göğüs X-Ray görüntülerini içeren bir veri kümesidir.

Agchung/Figure1 Veri Kümesi (COVID-chestxray-dataset, 2020): Vakaların cinsiyet, yaş, pO₂ saturasyonu meta verilerini de içerecek şekilde paylaşılmıştır.

ML Hannover Veri Kümesi (COVID-19 Image Repository, 2020): Proje kapsamında oluşturulan bu veri kümesinde, radyolojik görüntülemeye odaklanılarak COVID-19 vakalarından bir veri kümesi oluşturulmuştur. Veri kümesi görüntülerle beraber vakalara dair kapsamlı meta verileri de içermektedir.

Cancer Imagine Archive (Actualmed COVID-19 Chest X-ray Dataset Initiative, 2020): Arkansas Üniversitesi Tıp Bilimleri tarafından toplanmış bir veri kümesidir. COVID-19 testi pozitif etiketlenmiş 200 X-Ray görüntüsü, yaş, cinsiyet, ırk gibi meta bilgiler ve seçilmiş laboratuvar verileri içermektedir.

HM Hospitales Veri Kümesi (COVID-19-AR, 2020): 5000'den fazla COVID-19 pozitif vakası içermektedir. Görüntü bilgileriyle beraber cinsiyet, yaş ve seçilmiş laboratuvar bilgilerini de içermektedir. Veri kümesinin kullanımı sadece hastaneden alınan izinle mümkündür.

RSNA Zatürre Kaggle Veri Kümesi (Covid Data Save Lives, 2020): COVID-19 verisi içermeyen zatürre ve sağlıklı verilerin yer aldığı, görüntü adedi açısından çok zengin bir veri kümesidir, 30 binden fazla görüntü içermektedir.

UCSD-Guangzhou Pediatrik Veri Kümesi (Shih vd., 2019): Zatürre ve sağlıklı verilerin yer aldığı, COVID-19 verisi ve meta veri içermeyen, 5000'den fazla görüntüden oluşan bir veri kümesidir. Viral/bakteriyel zatürre ve sağlıklı görüntüler olmak üzere üç farklı sınıfta görüntü içermektedir.

Kaggle COVID-19 radiography Veri Kümesi (Chowdhury vd., 2020): Bu veri kümesi (Cohen vd., 2020) ve (Shih vd., 2019)'deki veri kümelerinden oluşturulmuş, meta veri içermeyen sadece göğüs X-Ray görüntülerini kapsayan bir veri kümesidir. COVID-19, zatürre ve sağlıklı olarak üç farklı sınıfta etiketlenmiş görüntüleri içermektedir.

BIMCV Veri Kümesi: Valencia Dijital Tıbbi Görüntü Bankası (Banco digital de Imagen Medica de la Comunidad Valenciana) tarafından oluşturulmuş geniş bir veri kümesidir. Bu veri kümesinin altında yer alan BIMCV-PADCHEST Veri Kümesi (Bustos vd., 2020), San Juan Hastanesi'nin 2007 ve 2019 yılları arasındaki radyolojik verilerinden oluşturulmuştur. Göğüs X-Ray ve Bilgisayarlı Tomografi (Computed Tomography- CT) tipinde görüntüler içermektedir. DICOM dosyaları meta veriler (yaş, cinsiyet, görüntü pozisyonu) içerir. 69,882 kişinin 160,868 adet etiketlenmiş verisini içermektedir. KOAH, zatürre, pulmoner ödem gibi birçok farklı sınıfı içermektedir. BIMCV-COVID19 Veri Kümesi (Vayá vd., 2020), 1311 COVID-19 vakasından alınmış 2265 göğüs X-Ray görüntüsü ve 163 CT görüntüsü içermektedir. Bu görüntülerin yanı sıra meta verileri de içermektedir.

CheXpert Veri Kümesi (Irvin vd., 2019): Stanford Hastanesi'ne ait olan bu veri kümesi 65,240 kişiden alınmış 224,316 adet göğüs X-Ray görüntüsü içermektedir. Veri kümesinde on dört farklı radyografik bulgu yer almaktadır.

Sentetik Covid19(+) Veri Kümesi (Zunair vd., 2021): 21,295 farklı sentetik COVID-19 X-Ray görüntüsünü içeren bir veri kümesidir. RSNA ve Cohen veri kümelerinden veriler kullanılmıştır. Bu veri kümelerindeki zatürre ve sağlıklı veriler kullanılarak GAN ile sentetik COVID-19 X-Ray görüntüleri üretilmiştir.

COVIDx Veri Kümesi (Wang ve Wong, 2020): (Cohen vd., 2020; COVID-chestxray-dataset, 2020; Covid Data Save Lives, 2020)'de verilen veri kümeleri kullanılarak oluşturulan bir veri kümesidir. Görüntülerin yanı sıra yaş, ateş

hasta notları gibi meta verileri de içermektedir. Veri kümesinde sağlıklı, zatürre ve COVID-19 olmak üzere üç farklı sınıf verilmiştir.

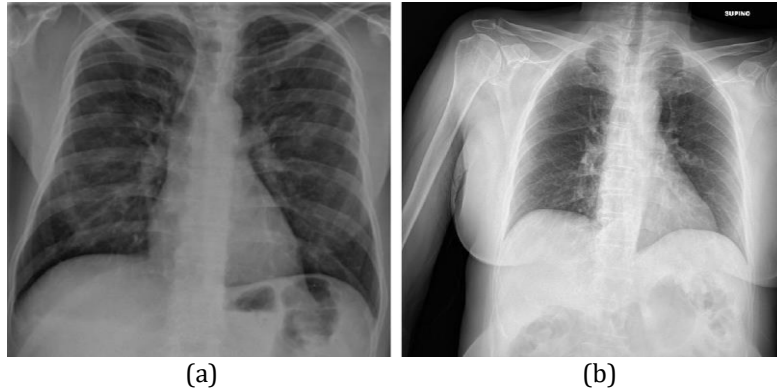
Andrewmvd Kaggle Veri Kümesi (COVID-19 X rays, 2020): CT anlık durum görüntüleri ve X-Ray görüntülerini içermektedir. Görüntülerin yanı sıra verinin kaynağı ve COVID-19 bilgisine dair etiket içeren meta veri dosyası içermektedir.

Montgomery Veri Kümesi (COVID-19 CT scans, 2020), 2014 yılında oluşturulan ve 138 X-Ray görüntüsü içeren bir veri kümesidir. Görüntüler DICOM formatında olup, COVID-19 öncesi döneme ait tüberküloz araştırmasıdır. Veri kümesi 58 tüberküloz, 80 sağlıklı vaka içermektedir. Görüntülerin yanı sıra yaş, cinsiyet, görüntü pozisyonu meta verilerini de içermektedir.

Shenzhen Veri Kümesi (COVID-19 CT scans, 2020): Montgomery veri kümesi ile yayınlanan veri kümesidir. Görüntülerin yanı sıra yaş, cinsiyet, görüntü pozisyonu meta verilerini de içermektedir. Veri kümesi 336 tüberküloz 326 sağlıklı vaka içermektedir.

Prashant Patel Kaggle Veri Kümesi (Patel, 2021): COVID-19, zatürre ve sağlıklı vaka bilgilerinin yer aldığı veri kümesidir. Meta veri içermemektedir. (Cohen vd., 2020; COVID-chestxray-dataset, 2020; Shih vd., 2019)'de verilen veri kümelerinin birleştirilmiş halidir. 576 COVID-19, 4273 zatürre, 1583 sağlıklı toplam 6432 vaka görüntüsü içermektedir.

Şekil 1'de Andrewmvd Kaggle Veri Kümesi'nde yer alan COVID-19 ve sağlıklı vakalara ait göğüs X-Ray görüntüleri verilmiştir.



Şekil 1. COVID-19+ (a) ve Sağlıklı (b) Göğüs X-Ray Görüntüleri (Chest X-Ray Images With Positive COVID-19 (a) and Negative COVID-19 (b)) (COVID-19 X rays, 2020)

Yukarıda verilen veri kümeleri, literatürde göğüs X-Ray görüntülerinden COVID-19 tespiti amaçlı en çok kullanılan veri kümeleridir. Bu veri kümelerine ait karşılaştırmalı analiz Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda, her bir veri kümesinin boyutu, görüntülerin kaç sınıf içerdiği, görüntü tipi ve meta veri (yaş, cinsiyet bilgisi vb.) içerip içermediği bilgileri özetlenmiştir.

Tablo 1. Göğüs X-Ray Görüntü Veri Kümeleri (Chest X-Ray Image Datasets)

Ref.	Veri Kümesi Bilgileri				Erişim Linki
	Boyutu	Sınıflandırma	Görüntü Tipi	Meta Veri	
(Cohen vd., 2020)	650	COVID-19 (+) Sağlıklı	X-Ray	Offset, cinsiyet, yaş, bulgu, PCR Test, entübe tarihi, ateş, pO2 saturasyonu, klinik notlar	https://github.com/ieee8023/covid-chestxray-dataset
(COVID-chestxray-dataset, 2020)	48	COVID-19 (+) Zatürre Sağlıklı	X-Ray	Offset, cinsiyet, yaş, bulgu, ateş, pO2 saturasyonu, klinik notlar, görüntüye dair notlar	https://github.com/agchung/Figure1-COVID-chestxray-dataset
(COVID-19 Image Repository, 2020)	240	COVID-19 (+)	X-Ray	Offset, cinsiyet yaş, kilo, görüntü boyutu, ateş, pO2 saturasyonu.	https://github.com/ml-workgroup/COVID-19-image-repository
(Actualmed COVID-19 Chest X-ray Dataset Initiative, 2020)	200	COVID-19 (+)	X-Ray, CT	Cinsiyet, yaş, ırk, kilo, boy, kanser, hamile, Test sonucu, Test adı	https://wiki.cancerimagingarchive.net/pages/viewpage.action?pageId=70226443
(COVID-19-AR, 2020)	5000+	COVID-19 (+)	X-Ray	Cinsiyet, yaş ve laboratuvar bilgileri	https://www.hmhosptales.com/coronavirus/covid-data-save-lives/english-version
(Covid Data Save Lives, 2020)	30000	Zatürre Sağlıklı	X-Ray	Cinsiyet, yaş, entübe tarihi, laboratuvar bilgileri	https://www.kaggle.com/nih-chest-xrays/data
(Shih vd., 2019)	5000	Zatürre Sağlıklı	X-Ray	Yok	https://www.kaggle.com/paultimothymooney/chest-xray-pneumonia
(Chowdhury vd., 2020)	20000+	COVID-19 (+) Zatürre Sağlıklı	X-Ray	Yok	https://www.kaggle.com/tawsifurrahman/covid19-radiography-database
(Bustos vd., 2020)	160000	Zatürre Sağlıklı	X-Ray	Yaş, cinsiyet, görüntü pozisyonu,	https://bimcv.cipf.es/bimcv-projects/padchest
(Vayá vd., 2020)	2265	COVID-19 (+) Zatürre Sağlıklı	X-Ray, CT	Yaş, cinsiyet, görüntü pozisyonu,	https://github.com/BIMCV-CSUSP/BIMCV-COVID-19
(Irvin vd., 2019)	224316	COVID-19 (+) Zatürre Sağlıklı	X-Ray	Radyografik bulgu	https://stanfordmlgroup.github.io/competitions/chexpert/
(Zunair vd., 2021)	21295	Covid 19 (+)	X-Ray	Yok	https://github.com/hasibzunair/synthetic-covid-cxr-dataset
(Wang ve Wong, 2020)	16352	COVID-19 (+) Zatürre Sağlıklı	X-Ray	Yaş, cinsiyet, ateş, görüntüye dair notlar.	https://github.com/lindawang/COVID-Net
(COVID-19 X rays, 2020)	99	COVID-19 (+) Sağlıklı	X-Ray, CT	Görüntü referansı	https://www.kaggle.com/andrewmvd/convid19-X-Rays
(COVID-19 CT scans, 2020)	138	Sağlıklı Tüberküloz	X-Ray	Yaş, cinsiyet	https://www.kaggle.com/raddar/tuberculosis-chest-xrays-montgomery
(COVID-19 CT scans, 2020)	662	Sağlıklı Tüberküloz	X-Ray	Yaş, cinsiyet	https://www.kaggle.com/raddar/tuberculosis-chest-xrays-shenzhen
(Patel, 2021)	6432	COVID-19 (+) Zatürre Sağlıklı	X-Ray	Yok	https://www.kaggle.com/prashant268/chest-xray-covid19-pneumonia

Literatürde COVID-19 tespiti amaçlı yukarıda verilen veri kümelerini kullanan çalışmalar, GAN ile sentetik veri üretiminin yapıldığı çalışmalar ve transfer öğrenimi yöntemlerini kullanan çalışmalar olmak üzere iki alt başlık altında kapsamlı olarak incelenmiştir.

3. Göğüs X-Ray Görüntüleri Üzerinden COVID-19 Tespiti Yapan Çalışmalar (The Studies on the COVID-19 Detection from Chest X-Ray Images)

Özellikle medikal görüntüler üzerinde yapılan çalışmalar ele alındığında, gerçeğe yakın sentetik veri üretimi, veri kümesinin çoğaltılması önemli bir açık problemdir. Bu çalışmada, göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden COVID-19 tespiti yapan çalışmalar arasından özellikle GAN ile sentetik veri üretimi yapılan çalışmalar ele alınarak, bu problem için GAN başarımı değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra son yıllarda başarılı sonuçların elde edildiği transfer öğrenimi mimarilerinin göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden COVID-19 tespiti amaçlı kullanımını içeren çalışmalar ve elde edilen sonuçlar detaylarıyla incelenmiştir.

3.1. GAN ile Sentetik Veri Üretimi Yapan Çalışmalar (The Studies on the Generation of Synthetic Data by using GANs)

COVID-19 pandemi sürecinin ilk dönemlerinde yapılan çalışmalarda, yapay zekâ modellerinin ihtiyaç duyduğu kadar göğüs X-Ray görüntülerini içeren büyük boyutlu veri kümeleri mevcut değildi. Bu nedenle, eldeki veri kümelerinde yer alan görüntülerden sentetik görüntüler üretilerek, kullanılan veri kümeleri genişletildi. GAN ağ

modelleri 2014 yılında Goodfellow ve arkadaşlarının çalışmasında (Goodfellow vd., 2014) verilen oyun teorisi temel alınarak tasarlanmıştır. Bu ağ modelleri eldeki verilerle aynı istatistiklere sahip sentetik veriler oluşturmayı hedefler. Bu bölümde göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden GAN kullanılarak sentetik veri üretimi gerçekleştiren ve sonrasında farklı makine öğrenmesi ve/veya derin öğrenme yöntemleriyle COVID-19 tespiti yapan çalışmalar verilmiştir. Bu çalışmalarda kullanılan modeller ve başarımları detaylandırılmıştır.

Rasheed ve arkadaşlarının çalışmasında (Rasheed vd., 2021), göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden COVID-19 tespiti amaçlı, lojistik regresyon (LR), Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis-PCA) ve CNN tabanlı sınıflandırma yapılmıştır. Çalışmada GAN ile sentetik veri üretimi yapılmıştır, bu amaçla (Cohen vd., 2020; Shih vd., 2019)'de verilen veri kümeleri ve bu veri kümelerinden oluşturulan sentetik veriler kullanılmıştır. Çalışmada, 52'si sentetik 250 COVID-19(+) X-Ray görüntüsü, 40'ı sentetik sağlıklı X-Ray görüntüsü kullanılmıştır. Modelde lojistik regresyon ve CNN sınıflandırma ile sırasıyla %95,2 ve %97,6 doğruluk oranı sağlanırken, PCA ve CNN ile ise sırasıyla %97,6 ve %100 doğruluk oranı sağlanmıştır.

Zebin ve Rezvy tarafından yapılan çalışmada (Zebin ve Rezvy, 2020), COVID-19 X-Ray görüntüleri için (Cohen vd., 2020)'de verilen veri kümesi, zatürre ve sağlıklı göğüs X-Ray görüntüleri için ise (Shih vd., 2019)'de verilen veri kümeleri kullanılmıştır. Bu üç farklı veri kümesi için 300'er X-Ray görüntüsü bulunmaktadır. Ayrıca, 100 tane sentetik X-Ray görüntüsü GAN kullanılarak üretilmiştir. Çalışmada, önceden eğitilmiş CNN modeli tabanlı transfer öğrenme yöntemlerinden olan VGG16, ResNet50 ve EfficientNetB0 modelleri kullanılmıştır. Bu modeller kullanılarak sırasıyla VGG16, ResNet50 ve EfficientNetB0 için %90, %94,3 ve %96,8 doğruluk oranıyla sınıflandırma gerçekleştirilmiştir.

Motamed ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Motamed vd., 2020), CNN modellerinin gerekli veri kümesi ile beslenmediğinde yaşanan problemleri aşmak için çözüm yolları aranmıştır. (Wang ve Wong, 2020)'da verilen veri kümesinden 300 COVID-19(+), 300 sağlıklı, 300 zatürre göğüs X-Ray görüntüsü, (Kermany vd., 2018) veri kümesinden 500 sağlıklı ve 500 zatürre görüntüsü eğitim veri kümesi için kullanılmıştır. Sentetik veri üreten GAN mimarisi için veri kümelerindeki diğer görüntülerden de faydalanılmıştır. Çalışmada, geleneksel sentetik veri üretimi, IAGAN, DCGAN mimarileri kıyaslandığında en iyi sonuç IAGAN ile alınmıştır.

Khalifa ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Khalifa vd., 2020), %10 gerçek veri, %90 eldeki verilerden GAN ile üretilmiş sentetik veri ile bir COVID-19 tespiti gerçekleştirilmiştir. Sağlıklı ve zatürre göğüs X-Ray görüntülerinden oluşan veri kümesi (Kermany vd., 2018) kullanılmıştır. Resnet 18 modeli ile %99 başarı sağlanmıştır.

Loey ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Loey vd., 2020), (Kermany vd., 2018 ;Cohen vd., 2020)'deki veri kümelerinden görüntüler ile sentetik veri üretilerek COVID-19 tespiti gerçekleştirilmiştir. Toplamda 307; COVID-19(+), sağlıklı, bakteriyel zatürre ve viral zatürre göğüs X-Ray görüntülerinden oluşan veri kümesi kullanılmıştır. Resnet 18, Googlenet ve Alexnet ile ikili sınıflandırmada %100 doğruluk oranı elde edilmiştir.

Waheed ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Waheed vd., 2020), (Cohen vd., 2020; COVID-chestxray-dataset, 2020; Chowdhury vd., 2020)'deki veri kümelerinden görüntüler ile sentetik veri üretilerek COVID-19 tespiti gerçekleştirilmiştir. Toplamda 1124; COVID-19(+) ve sağlıklı göğüs X-Ray görüntülerinden oluşan veri kümesi kullanılmıştır. Geliştirilen CNN modeli ile eldeki veri kümesi ile %85 doğruluk oranı elde edilirken, üretilen sentetik verilerin de dahil olduğu veri kümesi ile ise %95 doğruluk oranı elde edilmiştir.

Tabik ve arkadaşlarının çalışmasında (Tabik vd., 2020), veri ön işleme aşamasında GAN ile segmentasyon işlemi yapılmıştır. Toplamda 852; COVID-19 ve sağlıklı göğüs X-Ray görüntülerinden oluşan ve çalışmada verilen veri kümesi kullanılmıştır. Geliştirilen COVID-SDNET modeli ile %80 doğruluk oranı, %81,75 F1-skoru elde edilmiştir.

Yukarıda verilen literatürde yer alan çalışmalar göz önüne alındığında, özellikle GAN ile sentetik göğüs X-Ray görüntülerinin oluşturulduğu veri kümelerinin kullanımının model başarımlarını arttırdığı açıktır.

3.2. Transfer Öğrenimi ile COVID-19 Tespiti Yapan Çalışmalar (The Studies on the COVID-19 Detection by using Transfer Learning)

Önceden eğitilmiş transfer öğrenimi mimarilerinin kullanımı, yapay zekânın medikal alandaki çalışmalarında artış göstermektedir. Öğrenme aktarımı sayesinde görüntüler üzerinde daha yüksek doğruluk oranıyla çalışmalar yapılabilir. Bu bölümde özellikle önceden eğitilmiş CNN tabanlı transfer öğrenimi modellerinin, göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden COVID-19 tespiti amaçlı kullanıldığı çalışmalar ele alınmıştır.

Chowdhury ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Chowdhury vd., 2020), COVID-19(+) göğüs X-Ray görüntüleri için (Cohen vd., 2020; Chowdhury vd., 2020; SIRM, 2021; Chest Imaging, 2021)'de verilen veri kümeleri, zatürre ve sağlıklı göğüs X-Ray görüntüleri için ise sırasıyla (Wang vd., 2017)'de ve (Shih vd., 2019)'de, verilen veri kümeleri kullanılmıştır. Bu üç farklı veri kümesinin için sırasıyla 423, 1579, 1475 göğüs X-Ray görüntüsü seçilerek bir veri kümesi oluşturulmuştur. Bu çalışmada 2000'den fazla sentetik görüntü üretilmiştir, çalışmada sentetik görüntülerin yer almadığı veri kümesiyle elde edilen sonuçlarla, sentetik verilerin yer aldığı veri kümesiyle elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. En iyi başarıyı, sentetik veri kullanılan ve ikili sınıflandırma çalışmasında önceden eğitilmiş CNN modeli tabanlı transfer öğrenme yöntemlerinden olan DenseNet201 ile sağlamıştır. İkili sınıflandırma sonucu %99,7 doğruluk oranı, çoklu sınıflandırma sonucu %97,9 doğruluk oranı sağlanmıştır.

Jain ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Jain vd., 2021), 1583 sağlıklı, 576 COVID-19(+), 4273 zatürre X-Ray görüntüsü içeren (Patel, 2021)'de verilen veri kümesini kullanılmıştır. CNN tabanlı Xception net, Inception v3 ve ResNet mimarileri içinde Xception modeli %97,97 doğruluk oranı ile en başarılı sonucu vermiştir.

Öksüz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Öksüz vd., 2020), COVID-19(+), zatürre ve sağlıklı göğüs X-Ray görüntüleri için (Chowdhury vd., 2020)'de verilen veri kümesi kullanılmıştır. Çalışmada, önceden eğitilmiş CNN modeli tabanlı transfer öğrenme yöntemleri olan EfficientNet-B0, ShuffleNet ve FuzzyNet kullanılarak hibrit bir model geliştirilmiştir. Modelde %98,30 doğruluk oranı elde edilmiştir.

Chouhan ve arkadaşlarının çalışmalarında (Chouhan vd., 2020), beş farklı CNN modeli tabanlı transfer öğrenme yöntemi kullanarak göğüs X-Ray görüntülerinden zatürre tespiti gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, (NIH, 2021)'de verilen veri kümesinde yer alan 5232 göğüs X-Ray görüntüsü kullanılmıştır. 1346 sağlıklı göğüs X-Ray görüntüsü, 2538 bakteriyel zatürre göğüs X-Ray görüntüsü ve 1345 viral zatürre göğüs X-Ray görüntüsü kullanılmışlardır. AlexNet, Densenet201, Inception v3, GoogleLeNet, Resnet 18 ile yaptıkları çalışmalar sonrasında önerdikleri Ensemble Model ile %96,3 doğruluk oranı ile en iyi sonucu elde etmişlerdir.

Pathak ve arkadaşları tarafından yapılan COVID-19 sınıflandırma çalışmasında (Pathak vd., 2020), 219 COVID-19(+), 1341 sağlıklı ve 1345 viral zatürre CT görüntüsü veri kümesi (Dilbag vd., 2020) kullanılmıştır. CNN modeli tabanlı transfer öğrenme yöntemiyle geliştirdikleri ResNet-50 ile en iyi sonuçları elde etmişlerdir. Model %96 doğruluk oranı sağlamıştır.

Apostolopoulos ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Apostolopoulos vd., 2020), 504 sağlıklı göğüs X-Ray görüntüsü, 700 bakteriyel zatürre X-Ray görüntüsü ve 224 COVID-19 X-Ray görüntüsü içeren küçük veri kümesi (Cohen vd., 2020) kullanarak CNN modeli tabanlı transfer öğrenme yöntemlerinden olan VGG-19 (VGG-19, 2021) modeli ile çalışmışlardır. Model ikili sınıflandırmada %98,75, çoklu sınıflandırmada ise %93,48 doğruluk oranı sağlamıştır.

Hemdan ve arkadaşları çalışmalarında (Hemdan vd., 2020), göğüs X-Ray görüntülerinin CT görüntülerine kıyasla erişiminin daha kolay olduğunun altını çizerek küçük veri kümesi ile bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. (Cohen vd., 2020)'de verilen göğüs X-Ray COVID-19 görüntü veri kümesi ve (Zebin ve Rezvy, 2020)'de verilen sağlıklı görüntüler içinden 25 COVID-19(+), 25 sağlıklı görüntü üzerine çalışmışlardır. Göğüs X-Ray görüntüleri üzerine Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer-Aided Diagnosis-CAD) çalışması yapıp, model olarak VGG-19 ve DenseNet201 kullanılmıştır. Her iki yöntem için de %90 doğruluk oranı elde edilmiştir.

Ying ve arkadaşları üç boyutlu CT görüntülerini parçalayarak elde ettikleri görüntüleri çoğaltarak COVID-19 tespiti gerçekleştirmişlerdir (Ying vd., 2020). 88 COVID-19(+), 101 zatürre, 86 sağlıklı bireyin üç boyutlu CT görüntüleri parçalanarak 777 COVID-19(+), 505 zatürre, 708 sağlıklı insan verisi sağlanmıştır. CNN modeli tabanlı transfer öğrenme yöntemi olarak geliştirdikleri DRE-Net ile %94 doğruluk oranı ile en iyi sonuçları elde etmişlerdir.

Öztürk ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Öztürk vd., 2021), 125 COVID-19(+), 500 zatürre, 500 sağlıklı göğüs X-Ray görüntüsü içeren veri kümeleri (Cohen vd., 2020; Wang ve Wong, 2020) kullanılmıştır. Çalışmada, DarkNet (Redmon ve Farhadi, 2017) üzerine geliştirdikleri DarkCovidNet mimarisi ile çalışılmıştır. Çalışma sonucunda %98,08 doğruluk oranı ve %96,51 F1-skoru elde edilmiştir.

Ahmed ve arkadaşlarının çalışmasında (Ahmed vd., 2020), (Irvin vd., 2019; Wang ve Wong, 2020)'daki veri kümelerinden 15,134 görüntü kullanılmıştır. Görüntüler; 238 COVID-19(+), 6045 zatürre, 8851 sağlıklı görüntü içermektedir. Önerdikleri ReCoNet mimarisi ile %97,48 doğruluk oranı elde etmişlerdir.

Farooq ve arkadaşları çalışmalarında (Farooq vd., 2020), (Wang ve Wong, 2020) veri kümesinden 45 COVID-19(+), 1203 normal, 931 bakteriyel zatürre, 660 viral zatürre görüntülerini kullanmışlardır. Res-Net 50 mimarisi üzerine geliştirdikleri Covid-ResNet ile bir model önermişlerdir. Çalışma sonucunda %96,23 doğruluk oranı elde edilmiştir. Sağlıklı, bakteriyel zatürre, viral zatürre, COVID-19(+) sınıfları için sırasıyla %97,84, %96,37, %93,33, %100 F1-skoru elde edilmiştir.

Togaçar ve arkadaşları göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden COVID-19 tespiti gerçekleştirmiştir (Toğaçar vd., 2020). Çalışmada (Cohen vd., 2020; Chowdhury vd., 2020; Hosseiny vd., 2020; Ahmed vd., 2020) veri kümelerinden 458 görüntü kullanılmıştır. Veri kümesinde; 295 COVID-19, 65 sağlıklı, 98 zatürre görüntüsü vardır. MobileNetV2 ve SqueezeNet kullanılan çalışmada %99,27 doğruluk oranı elde edilmiştir.

Khan ve arkadaşları çalışmalarında (Khan vd., 2020), (Shih vd., 2019; Cohen vd., 2020) veri kümelerinden 1251 görüntü kullanmışlardır. Veri kümesinde; 284 COVID-19(+), 310 sağlıklı, 330 bakteriyel zatürre, 327 viral zatürre görüntü yer almaktadır. Çalışmada CNN tabanlı Xception mimarisi üzerine geliştirdikleri CoroNet ile çalışmışlardır. Çalışmada %89,50 doğruluk oranı elde edilmiştir.

Hammoudi ve arkadaşları (Hammoudi vd., 2020) 'de verilen çalışmalarında, (Shih vd., 2019; Cohen vd., 2020)'de verilen veri kümeleri içinden 6,008 görüntü kullanmışlardır. Veri kümesinde; zatürre ve sağlıklı 5,863 görüntü, COVID-19(+) 145 görüntü vardır. Çalışmada CNN tabanlı DenseNet169 mimarisi ile çalışmışlardır. Çalışmada %95,72 doğruluk oranı elde edilmiştir.

Singh ve arkadaşları çalışmalarında (Singh vd., 2021), (Mooney, 2018; Cohen vd., 2020; SIRM, 2021) veri kümelerinden 3057 görüntü kullanılmıştır. Veri kümesinde; 1345 zatürre, 1341 sağlıklı ve 371 COVID-19(+) görüntüsü vardır. Çalışmada HSGO mimarisi ile çalışılmış olup, %99,65 doğruluk oranı elde edilmiştir.

Das ve arkadaşları çalışmalarında (Das vd., 2021) , (Money 2018; Cohen vd., 2020; COVID-chestxray-dataset, 2020; Irvin 2020; Chest Imaging, 2021; SIRM, 2021) veri kümelerinden 1006 tane göğüs X-Ray görüntüsü kullanılmıştır. Veri kümesinde 538 COVID-19(+), 468 sağlıklı görüntü yer almaktadır. Çalışmada CNN tabanlı transfer öğrenimi mimarilerinden DenseNet201, ResNet50v2 and Inceptionv3 ve önerilen model ile çalışmışlardır. Çalışmada önerilen model ile %95,7 doğruluk oranı elde edilmiştir.

Sethy ve arkadaşlarının çalışmasında (Sethy ve Behera, 2020), (Cohen vd., 2020; Openi, 2020) veri kümelerinden 50 tane göğüs X-Ray görüntüsü kullanılmıştır. Veri kümesinde, 25 COVID-19(+), 25 sağlıklı göğüs X-Ray görüntüsü yer almaktadır. Çalışmada ResNet50 ile çalışılmış olup, önerilen model ile %95,28 doğruluk oranı elde edilmiştir.

Polat ve arkadaşlarının çalışmasında (Polat vd., 2021), (Wang vd., 2017; Irvin vd., 2019; Cohen vd., 2020) veri kümelerinden 1751 tane göğüs X-Ray görüntüsü kullanılmıştır. Veri kümesi 229 COVID-19(+), 1522 normal görüntüden oluşturulmuştur. Çalışmada CNN tabanlı transfer öğrenimi mimarilerinden DenseNet-161 üzerine yapılan ince ayarlar ile geliştirilen nCovNet olarak adlandırdıkları mimari ile çalışmışlardır. Çalışmada önerilen model ile %97,10'luk doğruluk oranı elde edilmiştir.

Sahlol ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Sahlol vd., 2020), sırasıyla 459 ve 462 göğüs X-Ray görüntüsü içeren iki veri kümesi (Shih vd., 2019; Chowdhury vd., 2020) ile çalışılmıştır. Eldeki verilerin öznetelik çıkarımı için Marine Predators Algoritması (MPA) kullanılmıştır. Çalışmada Inception mimarisi kullanılmıştır. Bu mimariyle birinci ve ikinci veri kümelerinden sırasıyla %98,7 ve %98,2 doğruluk oranları, %99,6 ve %99 F-1 skoru elde edilmiştir.

Bozkurt çalışmasında (Bozkurt, 2021), (Chowdhury vd., 2020) veri kümesinden 1200 adet COVID-19(+), 1345 adet viral zatürre ve 1341 adet sağlıklı göğüs X-Ray görüntüsü kullanılmıştır. Çalışmada CNN tabanlı transfer öğrenimi mimarilerinden VGG-16, VGG-19, ResNet50, Inception v3, Xception, AlexNet, DenseNet121 mimarileri ile sırasıyla %95.76, %95.50, %93.32, %93.70, %95.50, %95.76, %97.17 doğruluk oranları; %95.84, %95.59, %93.41, %93.75, %95.58, %95.81, %97.26 F-1 skoru elde edilmiştir.

Ismael ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Ismael vd., 2021), (Cohen vd., 2020) veri kümesinden 180 COVID-19(+), 200 adet sağlıklı göğüs X-Ray görüntüsü kullanılmıştır. Çalışmada CNN tabanlı transfer öğrenimi mimarilerinden VGG-16 ile %85.26, ResNet18 ile %88.42, ResNet50 ile %92.63, ResNet101 ile %87.37, VGG-19 ile %89.47 doğruluk oranı elde edilmiştir. Çalışmada %94.7 doğruluk oranı ile en iyi sonuç, ResNet50 ve SVM ile elde edilmiştir.

Yukarıda verilen çalışmalarda da görüldüğü gibi göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden COVID-19 tespiti amaçlı transfer öğrenimi modellerinin kullanımı model başarımlarını önemli oranda arttırmaktadır. Bu çalışmalara ait özet bilgiler aşağıdaki Tablo 2'de verilmiştir. Tabloda çalışmalarda kullanılan modeller, veri kümeleri, çalışılan örneklem sayıları, görüntü tipi, sentetik veri kullanılıp kullanılmadığı bilgisi ve önerilen çalışmanın performans metrikleri verilmiştir. Tabloda verilen çalışmalar incelendiğinde, transfer öğrenimi kullanılan modeller için özellikle sentetik veri üretimi yapılan çalışmalarda performansın yüksek olduğu görülebilir.

Tablo 2. Göğüs X-Ray Görüntüleri Üzerinden COVID-19 Tespiti Yapan Çalışmalar (The Studies on the COVID-19 Detection from Chest X-Ray Images)

Referans	Model	Kullanılan Veri Kümesi	Çalışılan Örneklem Sayıları	Görüntü Tipi	Sentetik Veri	Performans (%)
Rasheed (Rasheed vd., 2021)	GAN+CNN+LR	(Shih vd., 2019; Cohen vd., 2020)	250 COVID-19 (+) 250 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=97,6
Rasheed (Rasheed vd., 2021)	GAN+CNN+PCA	(Shih vd., 2019; Cohen vd., 2020)	250 COVID-19 (+) 250 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=100 F1-Skoru=100 Kesinlik=100 Duyarlılık=100
Zebin (Zebin ve Rezvy, 2020)	VGG16, ResNet50, EfficientNet-B0	(Shih vd., 2019; Cohen vd., 2020)	300 COVID-19 (+) 300 Zatürre 300 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=90 Doğruluk Oranı=94,3 Doğruluk Oranı=96,8
Chowdhury (Chowdhury vd., 2020)	DenseNet201	(Wang vd., 2017; Shih vd., 2019; Cohen vd., 2020; Chowdhury vd., 2020; SIRM, 2021; Chest Imaging, 2021)	423 COVID-19 (+) 1485 Zatürre 1579 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=99,7
Chowdhury (Chowdhury vd., 2020)	DenseNet201	(Wang vd., 2017; Shih vd., 2019; Cohen vd., 2020; Chowdhury vd., 2020; SIRM, 2021; Chest Imaging, 2021)	423 COVID-19 (+) 1579 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=97,9
Khalifa (Khalifa vd., 2020)	GAN + Resnet18	(Kermany vd., 2018)	(%10 Gerçek Veri + %90 Sentetik Veri)	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=99 F1-Skoru=98,97 Kesinlik=98,97 Duyarlılık=98,97
Khalifa (Khalifa vd., 2020)	GAN + Googlenet	(Kermany vd., 2018)	(%10 Gerçek Veri + %90 Sentetik Veri)	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=96,8 F1-Skoru=98,47 Kesinlik=98,63 Duyarlılık=98,31
Khalifa (Khalifa vd., 2020)	GAN + SqueezeNet	(Kermany vd., 2018)	(%10 Gerçek Veri + %90 Sentetik Veri)	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=97,8 F1-Skoru=94,46 Kesinlik=93,6 Duyarlılık=95,88
Jain(Jain vd., 2021)	Xception	(Patel, 2021)	576 COVID-19 (+) 4273 Zatürre 1583 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=97,97 F1-Skoru=94,6 Kesinlik=98 Duyarlılık=96
Jain(Jain vd., 2021)	Inception v3	(Patel, 2021)	576 COVID-19 (+) 4273 Zatürre 1583 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=96 F1-Skoru=95 Kesinlik=93,6 Duyarlılık=96,3
Jain(Jain vd., 2021)	ResNeXT	(Patel, 2021)	576 COVID-19 (+) 4273 Zatürre 1583 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=93 F1-Skoru=90,3 Kesinlik=94 Duyarlılık=88
Öksüz (Öksüz vd., 2020)	Ensemble-CVDNet	(Chowdhury vd., 2020)	219 COVID-19(+) 1345 Zatürre 1341 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=98,30 F1-Skoru=97,61
Öksüz (Öksüz vd., 2020)	EfficientNetB0	(Chowdhury vd., 2020)	219 COVID-19(+) 1345 Zatürre 1341 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=97,43 F1-Skoru=96,55
Öksüz (Öksüz vd., 2020)	SqueezeNet	(Chowdhury vd., 2020)	219 COVID-19(+) 1345 Zatürre 1341 Normal	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=95,3 F1-Skoru=91,67
Öksüz (Öksüz vd., 2020)	ShuffleNet	(Chowdhury vd., 2020)	219 COVID-19(+) 1345 Zatürre 1341 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=96,4 F1-Skoru=95,21
Öksüz (Öksüz vd., 2020)	MobileNet-v2	(Chowdhury vd., 2020)	219 COVID-19(+) 1345 Zatürre 1341 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=97,41 F1-Skoru=96,04
Chouhan (Chouhan vd., 2020)	Topluluk modeli (AlexNet+ Densenet121+Inception v3+ GoogleLeNet + Resnet 18)	(NIH, 2021)	1346 Sağlıklı 2538 Bakteriyel zatürre 1345 Viral zatürre	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=96,3 Kesinlik=93,28 Duyarlılık=99,62 AUC=99,34
Pathak(Pathak vd., 2020)	Resnet-50	(Dilbag vd., 2020)	413 COVID-19(+) 439 Normal	Göğüs CT	Yok	Doğruluk Oranı=93 F1-Skoru=95,18

Apostolopoulos(Apostolopoulos vd., 2020)	VGG-19	(Cohen vd., 2020)	224 COVID-19(+) 700 Zatürre 504 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=93,48
Apostolopoulos(Apostolopoulos vd., 2020)	VGG-19	(Cohen vd., 2020)	224 COVID-19(+) 504 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=98,75
Apostolopoulos(Apostolopoulos vd., 2020)	Mobile Net	(Cohen vd., 2020)	224 COVID-19(+) 700 Zatürre 504 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=92,85
Apostolopoulos(Apostolopoulos vd., 2020)	Mobile Net	(Cohen vd., 2020)	224 COVID-19(+) 504 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=97,40
Hemdan (Hemdan vd., 2020)	VGG-19	(Shih vd., 2019; Cohen vd., 2020)	25 COVID-19 (+) 25 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=90 F1-Skoru=91,5 Kesinlik=90 Duyarlılık=90
Hemdan (Hemdan vd., 2020)	DenseNet201	(Shih vd., 2019; Cohen vd., 2020)	25 COVID-19 (+) 25 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=90 F1-Skoru=91,5 Kesinlik=90 Duyarlılık=90
Hemdan (Hemdan vd., 2020)	Xception	(Shih vd., 2019; Cohen vd., 2020)	25 COVID-19 (+) 25 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=90 F1-Skoru=79 Kesinlik=85,5 Duyarlılık=80
Öztürk (Öztürk vd., 2021)	DarkCovidNet	(Cohen vd., 2020; Wang ve Wong, 2020)	125 COVID-19(+) 500 Zatürre 500 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=87,02 F1-Skoru=87,37 Kesinlik=89,96 Duyarlılık=85,35
Öztürk (Öztürk vd., 2021)	DarkCovidNet	(Cohen vd., 2020; Wang ve Wong, 2020)	125 COVID-19(+) 500 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=98,08 F1-Skoru=96,51 Kesinlik=98,03 Duyarlılık=95,13
Ahmed (Ahmed vd., 2020)	ReCoNet	(Irvin vd., 2019; Wang ve Wong, 2020)	238 COVID-19(+) 6045 Zatürre 8851 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=97,48 Duyarlılık=97,39
Farooq (Farooq vd., 2020)	Covid-ResNet	(Wang ve Wong, 2020)	45 COVID-19(+) 1203 Sağlıklı 931 Bakteriyel zatürre 660 Viral zatürre	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=96,23 F1-Skoru=96,88
Toğaçar (Toğaçar vd., 2020)	MobileNetV2,	(Cohen vd., 2020; Chowdhury vd., 2020; Hosseiny vd., 2020; Ahmed vd., 2020)	295 COVID-19(+) 98 Zatürre 65 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=97,81 F1-Skoru=95,58 Kesinlik=96,02 Duyarlılık=95,51
Toğaçar (Toğaçar vd., 2020)	,SqueezeNet	(Cohen vd., 2020; Chowdhury vd., 2020; Hosseiny vd., 2020; Ahmed vd., 2020)	295 COVID-19(+) 98 Zatürre 65 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=98,54 F1-Skoru=99,06 Kesinlik=98,52 Duyarlılık=96,49
Khan (Khan vd., 2020)	CoroNet	(Shih vd., 2019; Cohen vd., 2020)	284 COVID-19 310 Sağlıklı 330 Bakteriyel zatürre 327 Viral zatürre	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=89,5 F1-Skoru=98 Kesinlik=97
Hammoudi (Hammoudi vd., 2020)	DenseNet169	(Shih vd., 2019; Cohen vd., 2020)	145 COVID-19 (+) 5,863 Normal ve zatürre	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=95,72
Singh (Singh vd., 2021)	HSGO	(Mooney, 2018; Cohen vd., 2020; SIRM, 2021)	371 COVID-19 (+) 1341 Sağlıklı 1345 Zatürre	Göğüs -Xray	Yok	Doğruluk Oranı=99,65 F1-Skoru=99,65 Kesinlik=99,66 Duyarlılık=99,65
Das (Das vd., 2021)	Önerilen Model	(Money 2018; Cohen vd., 2020; COVID-chestxray-dataset, 2020; Irvin 2020; Chest Imaging, 2021; SIRM, 2021)	538 COVID-19 (+) 468 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=95,7 Duyarlılık=98 F1- Score=96,2
Das (Das vd., 2021)	DenseNet201, l	(Money 2018; Cohen vd., 2020; COVID-chestxray-dataset, 2020; Irvin 2020; Chest Imaging, 2021; SIRM, 2021)	538 COVID-19 (+) 468 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=95,7 Duyarlılık=92 F1- Score=94,4
Das (Das vd., 2021)	ResNet50v2	(Money 2018; Cohen vd., 2020; COVID-chestxray-dataset, 2020; Irvin 2020; Chest Imaging, 2021; SIRM, 2021)	538 COVID-19 (+) 468 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=95,7 Duyarlılık=98 F1- Score=95,8
Das (Das vd., 2021)	Inceptionv3	(Money 2018; Cohen vd., 2020; COVID-chestxray-dataset, 2020; Irvin 2020; Chest Imaging, 2021; SIRM, 2021)	538 COVID-19 (+) 468 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=95,7 Duyarlılık=93 F1- Score=94,8
Sethy (Sethy ve Behera, 2020)	ResNet50+ SVM	(Cohen vd., 2020; Openi, 2020)	25 COVID-19(+) 25 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=95,33 Duyarlılık=95,33 F1-Skoru=95,34
Polat (Polat vd., 2021)	nCoV-Net	(Wang vd., 2017; Irvin vd., 2019; Cohen vd., 2020)	229 COVID-19(+) 1522 Zatürre	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=97,10 Duyarlılık=100 Kesinlik=96,72
Loey (Loey vd., 2020)	GAN+ ResNet18	(Kermany vd., 2018; Cohen vd., 2020)	69 COVID-19 79 Sağlıklı,	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=100 F1-Skoru=100 Kesinlik=100

						Duyarlılık=100
Loey (Loey vd., 2020)	GAN+ ResNet18	(Kermany vd., 2018; Cohen vd., 2020)	69 COVID-19 79 Sağlıklı, 79 Bakteriyel zatürre	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=81,48 F1-Skoru=84,66 Kesinlik=88,10 Duyarlılık=81,48
Loey (Loey vd., 2020)	GAN+ ResNet18	(Kermany vd., 2018; Cohen vd., 2020)	69 COVID-19 79 Sağlıklı, 79 Bakteriyel zatürre 79 Viral zatürre	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=69,46 F1-Skoru=69,46 Kesinlik=72,5 Duyarlılık=66,67
Loey (Loey vd., 2020)	GAN+ Googlenet	(Kermany vd., 2018; Cohen vd., 2020)	69 COVID-19 79 Sağlıklı,	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=100 F1-Skoru=100 Kesinlik=100 Duyarlılık=100
Loey (Loey vd., 2020)	GAN+ Googlenet	(Kermany vd., 2018; Cohen vd., 2020)	69 COVID-19 79 Sağlıklı, 79 Bakteriyel zatürre	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=81,48 F1-Skoru=81,46 Kesinlik=81,44 Duyarlılık=81,48
Loey (Loey vd., 2020)	GAN+ Googlenet	(Kermany vd., 2018; Cohen vd., 2020)	69 COVID-19 79 Sağlıklı, 79 Bakteriyel zatürre 79 Viral zatürre	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=80,56 F1-Skoru=82,32 Kesinlik=84,17 Duyarlılık=80,56
Waheed (Waheed vd., 2020)	GAN + CNN	(Cohen vd., 2020; COVID-chestxray-dataset, 2020; Chowdhury vd., 2020)	403 COVID-19 721 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=95 Duyarlılık=90
Tabik (Tabik vd., 2020)	GAN + COVID-SDNET	(Tabik vd., 2020)	426 COVID-19 (+) 426 Sağlıklı	Göğüs X-Ray	Var	Doğruluk Oranı=81
Bozkurt (Bozkurt, 2021),	DenseNet121	(Chowdhury vd., 2020)	1200 COVID-19(+), 1341 Sağlıklı, 1345 Viral zatürre	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=97.17 F1-Skoru=97.26 Kesinlik=97.31 Duyarlılık=97.23
(Ismael vd., 2021)	ResNet50+SVM	(Cohen vd., 2020)	180 COVID-19(+), 200 Sağlıklı,	Göğüs X-Ray	Yok	Doğruluk Oranı=95.79 F1-Skoru=95.92 Duyarlılık=94.00

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada literatürde yer alan göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden COVID-19 tespiti amaçlı önerilen yöntemler detaylı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda göğüs X-Ray görüntülerini içeren veri kümeleri ve bu veri kümelerinin özellikleri verilmiştir. Bunun yanı sıra, çalışma kapsamında özellikle, sentetik veri üretimi ve transfer öğrenim mimarilerinin bu alandaki başarımları araştırılarak önerilen modeller doğruluk oranı, F1-skor, kesinlik ve duyarlılık metrikleri açısından karşılaştırılmıştır.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden COVID-19 tespiti amaçlı, farklı transfer öğrenme modellerinin kullanımıyla model başarımının artırıldığı açıktır. Ayrıca sentetik veri üretiminin ve transfer öğrenmenin bir arada kullanıldığı çalışmaların da olduğu ve bu modellerin başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden COVID-19 tespiti yapan diğer çalışmalar için yol gösterici bir rehber olması açısından, veri kümelerinin kolayca erişiminin sağlanması ve yapılan çalışmaların karşılaştırmalı olarak raporlanması amaçlanmaktadır.

Yukarıdaki bölümlerde verilen ve kapsamlı olarak incelenen birçok çalışmada, daha yüksek başarımlı sonuçların elde edilmesinin ancak farklı modellerin ve sınıflandırıcıların bir arada hibrit olarak denenmesi ile elde edileceği sonucu verilmiştir. Bu kapsamda özellikle göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden dokusal özniteliklerin çıkarılması önemlidir. 2021 yılında yapılan çalışmalarda dokusal özniteliklerin çıkarılması amaçlı yerel ikili örüntü (Local Binary Pattern – LBP) (Bozkurt ve Bayram; 2021) tabanlı modellerin farklı sınıflandırıcılar ile kullanılmasının model başarımını arttırdığı gözlemlenmiştir.

Bunun yanı sıra tanı tespit sistemleri için COVID-19 tespitinin yanı sıra, göğüs X-Ray görüntüleri üzerinden farklı hastalıkların da aynı anda tespitinin yapılabileceği açıktır. Bu nedenle çoklu sınıflandırma yapabilecek, dokusal özniteliklerin başarılı olarak çıkarıldığı, makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı hibrit modellerin tasarımı ileriki çalışma olarak düşünülmektedir.

Bunun yanı sıra, yüksek başarımla sınıflandırma yapan bazı çalışmalarda veri kümelerinde kullanılan göğüs X-Ray görüntü sayılarının çok az olduğu gözlemlenmiştir. İleriki çalışmalarda, çoklu sınıflandırıcı model tasarlanırken veri kümeleri birleştirilerek daha fazla veri üzerinde model tasarımı gerçekleştirilecek ve sonuçlar karşılaştırılacaktır.

Tesekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı 1919B012005809 Başvuru Numaralı 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)

- Actualmed COVID-19 Chest X-ray Dataset Initiative, <https://github.com/agchung/Actualmed-COVID-chestxray-dataset>, 2020.
- Ahmed A., et al. Pneumonia Sample X-Rays, GitHub, 2019. <https://www.kaggle.com/ahmedali2019/pneumonia-sample-xrays>.
- Ahmed S., Yap M.H., et al. 2020. medRxiv.07.11.20149112; doi: <https://doi.org/10.1101/2020.07.11.20149112>
- Apostolopoulos I. D., Mpesiana T. A., 2020. Covid-19: automatic detection from x-ray images utilizing transfer learning with convolutional neural 15 networks, *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, vol. 43, pp.635–640.
- Bozkurt, F. 2021. Derin Öğrenme Tekniklerini Kullanarak Akciğer X-Ray Görüntülerinden COVID-19 Tespiti. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 24, pp. 149-156.
- Bozkurt, F. and Bayram, E. 2021. Local Binary Pattern Based COVID-19 Detection Method Using Chest X-Ray Images. 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU53274.2021.9477796.
- Bustos A., Pertusa A. 2020. Padchest: A large chest x-ray image dataset with multi-label annotated reports. *Medical Image Analysis*, page 101797.
- Chest Imaging, <https://threadreaderapp.com/thread/1243928581983670272.html>, 2021.
- Chest Imaging, <https://twitter.com/ChestImaging/status/1243928581983670272>, 2021.
- Chouhan, V., Singh, S.K., et al. 2020 A novel transfer learning based approach for pneumonia detection in chest X-ray images. *Appl. Sci.* 10, 559.
- Chowdhury, M.E.H., et al. , 2020. Can AI Help in Screening Viral and COVID-19 Pneumonia?. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 132665-132676. arXiv preprint arXiv:2003.13145.
- Cohen J. P., Morrison P., et al. 2020. Covid-19 image data collection: Prospective predictions are the future. arXiv preprint arXiv:2006.11988, 2020.
- Covid Data Save Lives, <https://www.hmhopital.com/coronavirus/covid-data-save-lives/english-version>, 2020.
- COVID-19 CT scans, <https://www.kaggle.com/andrewmvd/covid19-ct-scans>, 2020.
- COVID-19 Image Repository, <https://github.com/ml-workgroup/covid-19-image-repository>, 2020.
- COVID-19 X rays, <https://www.kaggle.com/andrewmvd/convid19-x-rays>, 2020.
- COVID-19-AR, <https://wiki.cancerimagingarchive.net/pages/viewpage.action?pageId=70226443>, 2020.
- COVID-chestxray-dataset, <https://github.com/agchung/figure1-COVID-chestxray-dataset>, 2020.
- Das, A.K., Ghosh, S., Thunder, S. et al. 2021. Automatic COVID-19 detection from X-ray images using ensemble learning with convolutional neural network. *Pattern Anal Applic* (2021). <https://doi.org/10.1007/s10044-021-00970-4>
- Dilbag S, Kumar V, Vaishali, Kaur M. 2020. "Classification of covid-19 patients from chest CT images using multi-objective differential evolution-based convolutional neural networks. *Eur J Clin Microbiol Infect Dis*" 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10096-020-03901-z>.
- Farooq M., Hafeez A., 2020. Covid-resnet: A deep learning framework for screening of covid19 from radiographs. arXiv preprint arXiv:2003.14395.
- Goodfellow, I.J., Pouget-Abadie J. et al.. Generative adversarial nets. In *NIPS*, 2014.
- Hammoudi K., et al. 2020. Deep learning on chest x-ray images to detect and evaluate pneumonia cases at the era of covid-19. arXiv preprint arXiv:2004.03399.
- He K., Zhang X., et al. 2016. Deep Residual Learning for Image Recognition," in 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 770–778
- Hemdan et al. 2020. "COVIDX-Net: A Framework of Deep Learning Classifiers to Diagnose COVID-19 in X-Ray Images", arXiv 2003.11055.
- Hosseiny M., et al. 2020. Radiology perspective of coronavirus disease 2019 (COVID-19): lessons from severe acute respiratory syndrome and Middle East respiratory syndrome, *Am. J. Roentgenol.* (2020) 1–5, <https://doi.org/10.2214/AJR.20.22969>.
- Huang G., Liu Z., et al. 2017. Densely Connected Convolutional Networks. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 2261–2269.
- Irvin J. Et al. 2019. Chexpert: A large chest radiograph dataset with uncertainty labels and expert comparison. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, volume 33, pages 590–597.
- Ismael, A. M., & Şengür, A. 2021. Deep learning approaches for COVID-19 detection based on chest X-ray images. *Expert Systems with Applications*, 164, 114054.
- Jaeger S., Candemir S., et al. 2014. Two public chest x-ray datasets for computer-aided screening of pulmonary diseases. *Quantitative imaging in medicine and surgery*, 4(6):475.
- Jain, R., Gupta, M., Taneja, S., & Hemanth, D. J. 2021. Deep learning based detection and analysis of COVID-19 on chest X-ray images. *Applied Intelligence*, vol. 51(3), pp. 1690-1700.
- Kermany D., Zhang K., et al. 2018. Labeled optical coherence tomography (oct) and chest x-ray images for classification. *Mendeley data*, 2.

- Khalifa N. E. M., Taha M. H. N., et al. 2020. Detection of Coronavirus (COVID-19) Associated Pneumonia based on Generative Adversarial Networks and a Fine-Tuned Deep Transfer Learning Model using Chest X-ray Dataset, arXiv: 2004.01184
- Khan AI, Shah JL, Bhat MM. 2020. CoroNet: A deep neural network for detection and diagnosis of COVID-19 from chest x-ray images. *Comput Methods Programs Biomed.*
- Krizhevsky A., Sutskever I., et al. 2012. ImageNet classification with deep convolutional neural networks, in *Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems, 2012*, pp. 1097–1105.
- Loey M. et al. 2020. "Within the lack of chest covid-19 x-ray dataset: A novel detection model based on gan and deep transfer learning," *Symmetry*, vol. 12, no. 4, p. 651.
- Mooney, P., Chest X-Ray Images (Pneumonia). <https://www.kaggle.com/paultimothymooney/chest-xray-pneumonia>, 2018.
- Motamed S., Rogalla P., Khalvati F. 2021. Data Augmentation Using Generative Adversarial Networks (GANs) For GAN-Based Detection Of Pneumonia And COVID-19 In Chest X-Ray Images. doi:10.21203/rs.3.rs-146161/v1
- NIH, <https://nihcc.app.box.com/v/ChestXray-NIHCC>, 2021.
- Öksüz C., Urhan O. ve Güllü M. K. 2020. Ensemble-CVDNet: A Deep Learning based End-to-End Classification Framework for COVID-19 Detection using Ensembles of Networks. arXiv:2012.09132
- Openi, <https://openi.nlm.nih.gov/>, 2020.
- Öztürk T., Talo M., et al. 2020. Automated detection of covid-19 cases using deep neural networks with x-ray images, *Computers in Biology and Medicine*, p. 103792.
- Patel, P. Chest X-ray (Covid-19 & Pneumonia), Accessed at: <https://www.kaggle.com/prashant268/chest-xray-covid19-pneumonia>, 2021.
- Pathak Y., Shuklab P.K., et al. 2020. Deep Transfer Learning Based Classification Model for COVID-19 Disease, <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2020.05.003>
- Polat Ç, Karaman O, Karaman C, Korkmaz G, Balci MC, Kelek SE. 2021. COVID-19 diagnosis from chest X-ray images using transfer learning: Enhanced performance by debiasing dataloader. *J Xray Sci Technol.* ;29(1):19-36. doi: 10.3233/XST-200757. PMID: 33459685; PMCID: PMC7990426.
- Rasheed, J., Hameed, A.A., Djeddi, C. et al. 2021. A machine learning-based framework for diagnosis of COVID-19 from chest X-ray images. *Interdiscip Sci Comput Life Sci* 13, 103–117
- Redmon J., Farhadi A. 2017. Yolo9000: better, faster, stronger. arXiv preprint, 2017.
- Sahlol, A.T., Yousri, D., Ewees, A.A. et al. 2020. COVID-19 image classification using deep features and fractional-order marine predators algorithm. *Sci Rep* 10, 15364 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71294-2>
- Sethy, P. K., & Behera, S. K. 2020. Detection of coronavirus Disease (COVID-19) based on Deep Features.
- Shell, J., Coupland S. 2012. Towards fuzzy transfer learning for intelligent environments, in *Ambient Intelligence, 2012*.7683: p. 145-160
- Shih, G., Wu, C.C., et al. 2019. Augmenting the national institutes of health chest radiograph dataset with expert annotations of possible pneumonia. *Radiology: Artificial Intelligence*, 1(1):e180041.
- Signoroni A., Savardi M. et al. 2020 End-to-end learning for semiquantitative rating of covid-19 severity on chest x-rays. arXiv 2006.04603
- Simonyan K., Zisserman A., 2014. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. pp. 1–14.
- Singh, A.K., Kumar, A., Mahmud, M. et al. 2021 COVID-19 Infection Detection from Chest X-Ray Images Using Hybrid Social Group Optimization and Support Vector Classifier. <https://doi.org/10.1007/s12559-021-09848-3>
- SIRM. <https://www.sirm.org/category/senza-categoria/covid-19/>,2021.
- Szegedy C., Vincent V.V. et al. 2016. Rethinking the inception architecture for computer vision, in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 2818–2826.
- Tabik, S., Gomez-Rios, A., et al., 2020. Covidgr dataset and covid-sdnet methodology for predicting covid-19 based on chest x-ray images. arXiv preprint arXiv:2006.01409.
- Tan M., Le Q. V. 2019. Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. arXiv preprint arXiv:1905.11946.
- Toğaçar M., Ergen B., Cömert., 2020. Covid-19 detection using deep learning models to exploit social mimic optimization and structured chest x-ray images using fuzzy color and stacking approaches. *Computers in Biology and Medicine*, p. 103805.
- Vayá I. et al. 2020. Bimcv covid-19+: a large annotated dataset of rx and ct images from covid-19 patients. arXiv preprint arXiv:2006.01174,
- VGG-19, <https://keras.io/api/applications/vgg/>, 2021.
- Waheed A., et al. 2020. Covidgan: Data augmentation using auxiliary classifier gan for improved covid-19 detection, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 91 916– 91 923, 2020.
- Wang X., Peng Y., et al. 2017. Chestx-ray8: Hospital-scale chest x-ray database and benchmarks on weakly-supervised classification and localization of common thorax diseases, in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 2097-2106.
- Wang, Z.Q.L.L. and Wong. A. 2020. Covid-Net: A tailored deep convolutional neural network design for detection of covid-19 cases from chest radiography images.
- Ying S., Zhen S., et al. 2020. Deep learning Enables Accurate Diagnosis of Novel Coronavirus (COVID-19) with CT images. <https://doi.org/10.1101/2020.02.23.20026930>
- Zebin, T., Rezvy, S., 2021. COVID-19 detection and disease progression visualization: Deep learning on chest X-rays for classification and coarse localization. *Appl Intell* 51, 1010–1021.
- Zhang X., Zhou X., M. Lin, et al. 2017. Shufflenet: An extremely efficient convolutional neural network for mobile devices. arXiv:1707.01083.
- Zunair et al. 2021. Synthesis of COVID-19 chest X-rays using unpaired image-to-image translation. *Social Network Analysis and Mining* 11, 23. doi:10.1007/s13278-021-00731-5.



AVOKADONUN BİYOAKTİF BİLEŞENLERİ VE SAĞLIK ÜZERİNE ETKİLERİ

Lale GÜMÜŞTEPE*, Ebru AYDIN, Gülcan ÖZKAN

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Avokado,
Biyoaktif Bileşenler,
Metabolik Sendrom,
Yan Ürünler.

Öz

Avokado, *Plantae* krallığına, Lauraceae ailesine, Laurales takımına, *Persea* cinsine ve *P. americana* türüne ait bir bitkidir. İçeriğindeki zengin biyoaktif bileşenlerin ve besin öğelerinin sağlık üzerine yararlı etkileri olduğu bilinen ve süper gıda olarak kabul edilen bitkisel kaynaklı bir gıdadır. Avokado ağacının; meyvesinin eti ve kabuğu, yaprağı ve çekirdeği zengin biyoaktif bileşenler içermektedir. Meyve çekirdeği (%16) ve kabuğu (%11) bazı çeşitlerde istisnalar olmak üzere meyvenin %21-30'unu temsil eden miktarlarda katı atık oluşturmaktadır. Avokadoda en yaygın bulunan biyoaktif bileşenler polifenoller, karotenoitler, tokoferoller ve sterollerdir. Polifenoller meyve eti, kabuk, tohum ve yapraklarda; karotenoitler ve tokoferoller ise avokado meyvesinin etinde bulunmaktadır. Avokadonun zengin biyoaktif içeriğinin metabolik sendrom hastalıklarına, hipoglisemik, antihipertansif, antioksidan, obezite, hiperlipidemik, antimikrobiyal, antiprotozoal ve antimikobakteriyel vb. hastalıklara etkisi literatürde ilgi çeken bir konu haline gelmiştir. Özellikle avokado atıklarından çekirdeğinin, meyvesinin kabuğunun ve yaprağının larvisidal, antifungal, antimikrobiyal, antioksidan, antiprotozoal, antidiyabetik, antihipertansif, hiperkolesterolemik ve antimikobakteriyel aktiviteler gibi birçok hastalığı durdurucu/yavaşlatıcı etkisinin olduğu bildirilmiştir. Bu derlemede, avokado ağacının; meyvesinin eti ve kabuğunun, yaprağının ve çekirdeğinin biyoaktif bileşenleri ve bu bileşenlerin sağlık üzerine etkileri incelenecektir.

BIOACTIVE COMPONENTS OF AVOCADO AND ITS HEALTH EFFECTS

Keywords

Avocado,
Bioactive Components,
Metabolic Syndrome,
By-Products.

Abstract

Avocados belong to the *Plantae* kingdom, the Lauraceae family, the order Laurales, the genus *Persea*, and the species *P. americana*. It is a plant-derived food which is implicated in various health-promoting and disease preventive effects. Therefore, it is considered a superfood. Avocado fruit pulp and peel, leaves and seeds are rich in both nutritive, such as vitamins, dietary fibers, and mineral and bioactive compounds, polyphenols, carotenoids, tocopherols and sterols. While carotenoids and tocopherols are mostly found in the fruit pulp, polyphenols are widely present in the fruit pulp and peel, seeds and leaves. Avocado fruit's seed (16%) and peel (11%) are consisted of 21-30% of the fruit as a solid waste except in some varieties. The rich bioactive compounds of avocado exhibited important biological activities in vitro and in vivo studies, suggesting possible prevention against several diseases such as hypoglycemic, antihypertensive, antioxidant, obesity, hyperlipidemik, antimicrobial, antiprotozoal and antimycobacterial activity etc. Therefore, its effect on diseases has become a subject of interest in the literature. It was reported that the seed, peel and leaf of the fruit, especially from the avocado waste, have larvicidal, antifungal, antimicrobial, antioxidant, antiprotozoal, antidiabetic, antihypertensive, hypercholesterolemik and antimycobacterial activities such as stopping/slowing down many diseases. In this review, avocado tree; the bioactive components of the fruit pulp and peel, leaves and seeds and the effects of these components on health will be examined.

* İlgili yazar/Corresponding author: lalegumustepe@gmail.com

Alıntı / Cite

Gumustepe, L., Aydın, E., Ozkan, G. (2022). Avokadonun Biyoaktif Bileşenleri ve Sağlık Üzerine Etkileri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 341-359.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

L. Gümüştepe, 0000-0002-1327-2596
E. Aydın, 0000-0002-5625-040X
G. Özkan, 0000-0002-3333-7537

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	06.10.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	15.11.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	19.11.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

Avokado, *Plantae* krallığına, *Lauraceae* ailesine, *Laurales* takımına, *Persea* cinsine aittir. Aslen Orta Amerika'dan gelen avokado ağacı *Persea* ve *Oreodaphne* olmak üzere iki alt türden oluşur. Botanik olarak '*Persea americana*' olarak isimlendirilen avokadonun yaygın olarak tüketilen üç türü bulunmaktadır: Bunlar *P. americana* var. *Drymifolia* (Meksikan ekotipi), *P. americana* var. *Guatemalensis* (Guatemalan ekotipi) ve *P. americana* var. *Americana* (Batı Hindistan ekotipi)'dir. *P. americana* var. *Americana*, Güney Amerika orijinli olup şekli armuda benzemektedir. Yağ içeriği %8'den az olan bu tür -2°C ve üzeri sıcaklıkta yetiştirilebilmektedir. *P. americana* var. *Guatemalensis* türü avokadoların ise orijini Orta Amerika'dır ve bu avokadolar yuvarlak bir görünüme sahiptir, geç olgunlaşır ve yağ içeriği yaklaşık %8-20 arasında değişmektedir. *P. americana* var. *Americana* türüne göre soğuğa daha çok dayanıklıdır, -4°C dereceye kadar dayanabilmektedir. *P. americana* var. *Drymifolia* türü ise diğer çeşitlere göre daha küçük, daha yüksek yağ içeriğine sahiptir (%20'den daha fazla) ve soğuğa en çok dayanan (-6°C'ye kadar) türdür (Martinez Pacheco vd., 2011; Koller, 1992). Mevcut ticari çeşitler belirtilen üç ırkın melezlenmesiyle üretilir. Örneğin Hass çeşidi Guatemala-Meksika hibrit grubuna ait olup yaygın olarak ticareti en fazla yapılan çeşittir. Ticaretteki diğer yaygın çeşitler arasında Bacon, Fuerte, Hass, Gwen, Lamb, Pinkerton, Reed ve Zutano olup her birinin farklı şekilleri, dokuları, renkleri ve kokuları bulunur (Dabas vd., 2013). Ayrıca en iyi bilinen ve pazarlanan türlerin Hass ve Fuerte çeşitleridir (Litz vd., 2007; SIAP, 2015).

Anavatanı Orta Amerika (Meksika, Guatemala, El Salvador ve Honduras) olmasına rağmen zengin besin içeriğinden dolayı avokado meyvesi günümüzde tropikal ve subtropikal bölgelerde ticari öneme sahip hale gelmiştir (Litz vd., 2007). FAO'nun 2018 yılında yayınladığı rapora göre 2016 yılında Dünya üzerinde en fazla avokado yetiştiren ülke %43 ile Meksika, %14 Dominik Cumhuriyeti, %10 Peru, %7 Kolombiya, %7 Endonezya, %5 Brezilya, %4 Kenya, %4 Amerika, %3 Şili ve %3 Çin olarak rapor edilmiştir. Ayrıca küresel avokado üretiminin 2018 yılında 6 milyon tonun üzerine çıktığı ve 547849 hektar büyüklüğünde alanda avokado üretildiği bildirilmiştir (FAO, 2018). Türkiye'de ise ilk olarak 1970'li yılların başında Kaliforniya'dan Fuerte, Hass, Bacon ve Zutano kültürleri getirilmiş olup bu türlerin ancak 1980'li yıllarında adaptasyonunun sağlandığı görülmüştür (Demirkol, 1995; Bayram vd., 2016). Tarım ve Orman Bakanlığının 2010 yılında yayınladığı araştırmada avokado üretiminin %75-80'nin Antalya bölgesinde %15-20'sinin Mersin'de ve %2-5'nin Muğla ve Hatay illerinde yapıldığı rapor edilmiştir (Bayram, 2010). TÜİK (2019) verilerine göre ise Türkiye'de avokado üretiminin 2017 yılında 2.765 ton iken, 2018 yılında 3.164 tona arttığı belirtilmiştir. 2018 yılında ki avokado üretiminin 2.567 tonunun Antalya, 496 tonunun Mersin, 79 tonunun Muğla ve 22 tonunun ise Hatay illerinde üretildiği rapor edilmiştir (TÜİK, 2019).

Sonuç olarak; avokado hem Türkiye hem de Dünya gıda pazarında oldukça önemli bir yere sahiptir. Çünkü avokado ağacının yaprak, meyve eti ve meyve atıkları (çekirdek ve meyve kabuğu), sağlığımız açısından çok değerli besin öğeleri ve fitokimyasalları bünyesinde barındırır. Dolayısıyla avokado gıda, tıp, eczacılık ve kozmetik sanayi gibi birçok alanda kullanımı mevcut olan bitkisel kaynaklı süper bir gıdadır. Bu literatür çalışmasında, avokado ağacının yapraklarının, meyve etinin ve meyve atıklarının (çekirdek ve meyve kabuğu) biyoaktif bileşen kompozisyonu ile birlikte bu bileşenlerin sağlık üzerine göstermiş olduğu etkiler incelenecektir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)**2.1 Biyoaktif Bileşenler (Bioactive Compounds)**

Bitkisel kaynaklarda bulunan biyoaktif bileşenler, bitkinin büyümesi ve gelişmesinde çeşitli fonksiyonlara sahip olan ikincil metabolitlerdir (Vermerris ve Nicholson, 2006). Avokado ağacının; meyvesinin eti ve kabuğu, yaprağı ve çekirdeği zengin besin öğeleri ve biyoaktif bileşenler içermektedir. Avokado meyve etinin; %67-78 nem, %13.5-24 yağ, %0.8-4.8 karbonhidrat, %1.0-3.0 protein, %0.8-1.5 kül ve %1.4-3.0 oranında lif içerdiği tespit edilmiştir (Dabas vd., 2013). Yapılan bir başka çalışmada ise meyve etinin çözünür (%30) ve çözünmez (%70) lif içeriğinin pek çok meyveye göre oldukça yüksek olduğu bulunmuştur (Araújo vd., 2018). Günlük yarım adet avokado (68 g) tüketiminin; tekli doymamış yağ asidi, posa, A, C, E, K ve B vitaminleri, potasyum, magnezyum gibi birçok besin öğesi ihtiyacının karşılanmasına katkı sağlayabileceği belirtilmiştir (Yurt ve Büyüktuncer Demirel,

2017). Avokado meyve kabuğunun; %62-73.3 karbonhidrat, %4-8.3 proteinler, %4.4-9.1 lipid ve yaklaşık %7.3-9.1 oranında ise lif içerdiği rapor edilmiştir (Domínguez vd., 2016; Colombo ve Papetti, 2019). Avokado ağacının meyvesinin çekirdeğinin; karbonhidrat (49.03 g/100g), lipid (17.90 g/100g), protein (15.55 g/100g) ve nem (15.10 g/100g) ile birlikte düşük miktarda kül (2.26 g/100g) içerdiği tespit edilmiştir (Ejiofor vd., 2018). Yapılan bir başka çalışmada ise avokado çekirdeğinin yapısında, %30 oranında polisakkarit bulunan, doğal bir nişasta kaynağı olduğu bildirilmiştir (Araújo vd., 2018). Avokado ağacının yapraklarında %5-6 nem, %4-5 yağ, %25-28 protein, %7-8 karbonhidrat, %38-43 lif ve %19-24 oranında kül içerdiği bildirilmiştir (Arukwe vd., 2012). Avokadoda en yaygın bulunan biyoaktif bileşenler ise polifenoller, karotenoidler, tokoferoller ve sterollerdir. Polifenoller meyve eti, kabuk, tohum ve yapraklarda dağılırken, karotenoidler ve tokoferoller çoğunlukla avokado meyvesinin etinde bulunmaktadır (López-Cobo vd., 2016; Jimenez vd., 2020).

Avokado meyve eti, meyve kütesinin % 52.9 ile 81.3'ünü temsil etmektedir (Tango vd., 2004). Avokado ağacının meyvesinin çekirdeği (%16) ve kabukları (%11) bazı çeşitlerde istisnalar olmak üzere meyvenin %21-30'unu temsil eden miktarlar da katı atık oluşturmaktadır (Alicia Ortiz vd., 2004; Wang vd., 2010; López-Cobo vd., 2016). Avokado ağacının yaprakları ve atıkları (çekirdek ve kabuk) şu anda ticari olarak kullanılmasa da, doğal bir biyoaktif bileşik kaynağıdır (Ortega-Arellano vd., 2019).

Avokado ağacının yaprakları, meyve eti ve atıklarında (çekirdek, kabuk) tanımlanan ana biyoaktif bileşenleri Tablo 1, 2 ve 3'te detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Avokado ağacının yaprağı, meyve eti ve atıklarında (çekirdek ve kabuk) bulunan polifenoller. (Polyphenols found in the leaf, fruit pulp and waste (seed and peel) of the avocado tree.)

Meyve Eti	Kabuk	Çekirdek	Yaprak	Referans
Apigenin	Apigenin	Kateşin	Apigenin	(Poovarodom vd., 2010; Monika ve Geetha, 2015; Isaac vd., 2014; López-Cobo vd., 2016; Polat Kose vd., 2020; Owolabi vd., 2010; Adeboye vd., 1999; De Almeida vd., 1998; Lima vd., 2012; Molina-Garza vd., 2014; Jiménez vd., 2017; Castro-López vd., 2019; Isaac vd., 2014; Utrera vd., 2012; Chávez vd., 2011; Araújo vd., 2020; Melgar vd., 2018; López-Cobo vd., 2016; Weremfo vd., 2020; Tremocoldi vd., 2018; Wang vd., 2010)
Kateşin	Kateşin	Epikateşin	Kateşin	
Epikateşin	Epikateşin	Epikateşin gallat	Epikateşin	
Luteolin	Epigallokateşin	Epigallokateşin	İzorhamnetin	
Naringenin	Prosiyanidin trimer A	Hidroksitirosoylglukozit	Prosiyanidin dimer B	
Prosiyanidinler	Prosiyanidin dimer B	Kaempferol	Prosiyanidin trimer A	
Kuersetin	Siyanidin 3-O-glukozit	Kaempferide	Kemferol	3-O-
Rutin	Hidroksitirosoyl glukozit	Naringenin	arabinopiranozot	
Vanilin	Kaempferol	Pirokatekol	Kemferol	3-O-β-
Tyrosolglukozit	Kaempferol	Prosiyanidinler	glukopiranozot	
Oktıl galat	ramnopiranosit	Sakuranetin	Kemferol	3-O-
Sinnamik asit	Luteolinpentosilheksodiz	Kuersetin	rhamnopyranosid	
Klorojenik asit	Naringenin	Kuersetin 3-O-arabinoz	Luteolin	
Kumarik asit	Multinoside	Rutin	Luteolin 7-O- glukozit	
p-kumarik asit	Pirokatekol	Tyrosolglukozit	Kuersetin	
Ellajik asit	Sakuranetin	Kafeik asit	Kuersetrim	
Ferulik asit	Kuersetin	Sinnamik asit	Kuersetin 3-O-arapiranosid	
Gallik asit	Kuersetinheksos	Klorojenik asit	Kuersetin	3-O-β-
Gentisik asit	Kuersetin-diglükosid	Kumarik asit	glukopiranozot	
Homovanilik asit	Kuersetin 3-O-arabinoz	Dihidroksifenilasetik asit	Kuersetin 3-O-β-D-glukozit	
Hidroksibenzoik asit	Kuersetin- xylosilramnosit	Ferulik asit	Rutin	
Protokateşuik asit	Rutin	Gentisik asit	Kafeik asit	
Resorsilik asit	Tyrosolglukozit	Hidroksibenzoik asit	Kumarik asit	
Sinapik asit	Vanilin	Neoklorojenik asit	Ferulik asit	
Vanilik asit	Kafeik asit	O-kafeoilkinik asit	Gallik asit	
Kuinik asit	Sinnamik asit	Siringik asit	Hidroksibenzoik asit	
Sitrik asit	Klorojenik asit	Trans-5-O-kafeoil-D-kinik asit	Prokateşuik asit	
Süksinik asit	Kumarik asit	Kumarik asit	Protokateşuik asit	
3-feruloilkinik asit	Dihidroksifenilasetik asit	Hidroksisinnamik asit	Resorsilik asit	
5-feruloilkinik asit	Ferulik asit	Kinik asit	Sinapik asit	
4-feruloilkinik asit	Gentisik asit	Sitrik asit	Siringik asit	
	Hidroksibenzoik asit	Hidroksitirosoyl glukozit	Vanilik asit	
	Protokatekuik asit	1-kafeoilkinik asit	Rosmarinik asit	
	Sinapik asit	3-O-p-kumaroilkinik asit	Fumarik asit	
	Vanilik asit	4-kafeoilkinik asit	Luteolin-5-glukozit	
	Hidroksisinnamik asit		Pirogalol	
	Perseitol		Herniarin	
	Kafeoilkinik asit		Klorojenik asit	
	Epikateşin gallat		Afzelin	
	Kinik asit		İzokersitrin	(kersetin-3-glukozit)
	Kersetin-3,4'-diglukozit		Kuersitrin	(kersetin-3-rhamnosit)
	Kersetin-3-O-arabinosil-glukozit		Kuersetin-O-heksosit	
			p-Kumarik asit	
			5-O-Kafeoilkinik asit	

Avokado meyve etinde bulunan ellajik asit (238.22 mg/100g), gallik asit (198.57 mg/100g), luteolin (165 mg/100g) ve rutin (141.79 mg/100g) en yaygın polifenol bileşiklerdir (Tablo 1). Wang ve arkadaşları (2010),

'Hass' avokado meyve etinde bulunan prosiyanidinlerin, antioksidan aktiviteye katkıda bulunan başlıca fenolik bileşiklerden biri olduğunu ve 'Hass' avokado meyve etinin incelenen diğer avokado çeşitlerine göre daha yüksek fenolik içeriğine ve antioksidan kapasiteye sahip olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca bir başka çalışmada, avokado meyvesinin ısıtma işlemi görme ve olgunlaşma derecesinin biyoaktif bileşen içeriğini etkilediği ve en yüksek toplam fenolik madde miktarının, kurutulmuş avokado meyvesinde bulunduğu bildirilmiştir (Ikpeme ve Ekerette, 2014; López-Cobo vd., 2016).

Avokado meyvesinin kabuğunda bulunan prosiyanidinler, flavonoller, hidroksibenzoik asit ve hidroksisinnamik asitler en yaygın biyoaktif bileşiklerdir (Tablo 1). Bunun yanında, avokado meyve kabuğunda prosiyanidinler (A ve B tipi), flavonoller, hidroksibenzoik asit ve hidroksisinnamik asitler gibi biyoaktif bileşiklerin de bulunduğu bildirilmiştir (López-Cobo vd., 2016; Figueroa vd., 2018; Colombo ve Papetti, 2019). Hass ve Fuerte avokado çeşitlerinin meyve kabuklarında yüksek miktarda B tipi prosiyanidin ve epikateşin bulunduğu bildirilmiştir (Tremocoldi vd., 2018). Bu çalışmayı Ortega-Arellano ve arkadaşlarının (2019) yapmış olduğu araştırma da desteklemektedir; araştırmaları kapsamında Hass, Fuerte, Reed ve Colinred'ten elde edilen ekstraktlardan Colinred avokado çeşidinin meyve kabuğu en yüksek toplam fenolik içerik içerdiği ve antioksidan aktiviteye sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Colinred avokado meyve kabuğunun HPLC-MSⁿ'ye göre başlıca fenolik bileşiminin B-tipi prosiyanidin ve epikateşin olduğu bildirilmiştir (Ortega-Arellano vd., 2019). Rotta ve arkadaşları (2016) tarafından avokado kabuğunun yeniden kullanılması amacıyla, kurutulmuş avokado meyve kabukları çay haline getirilmiş ve flavonoid ve fenolik bileşik içerikleri bakımından pazarlanan diğer çaylarla karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak avokado meyve kabuğu çayının antioksidan aktivitesinin yaygın olarak pazarlanan mate çayına benzediğini ve elma çayından daha yüksek oranda antioksidan aktivite gösterdiğini rapor etmişlerdir (Rotta vd., 2016; Cires vd., 2019).

Avokado çekirdeğinin polifenollerce (özellikle kateşin ve proantosiyenin) zengin olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kuersetin, prosiyanidin dimer A ve B tipi kafeoilkuinik asit, kumarik asit, gallik asit, 4-hidroksibenzoik asit, vanillik asit, kafeik asit, siringik asit, rutin ve ferulik asit içerdiği de bildirilmiştir (Tablo 1). Bunun yanında avokado çekirdeğinin yüksek miktarda fenolik bileşikler içerdiği ve yapılan *in vitro* çalışmalar sonucunda sentetik antioksidanlardan daha yüksek antioksidan aktiviteye sahip oldukları bulunmuştur (Rodríguez-Carpena vd., 2011; Gómez vd., 2014). Bir diğer çalışmada ise avokado çekirdeğindeki toplam fenolik içeriğinin meyve etinden daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir (Soong ve Barlow, 2004). Ayrıca yapılan farklı çalışmalarda avokado çekirdeklerinde ağırlıklı olarak A tipi ve B tipi prosiyanidin bulunduğu bildirilmiştir (Jimenez vd., 2020). Tremocoldi ve arkadaşları (2018) 'Hass' ve 'Fuerte' avokado çeşitlerinin çekirdeklerinin antioksidan aktivitelerini ve toplam fenolik madde miktarını araştırmışlar ve antioksidan aktiviteye önemli katkıda bulunan biyoaktif bileşiklerin, trans-5-O-kafeoil-D-kinik asit, B tipi prosiyanidin, kateşin ve epikateşin olduğunu tespit etmişlerdir. Wang ve arkadaşları (2010) ise normal fazlı HPLC-ESI-MSⁿ kullanarak, avokado çekirdeklerinde, kateşin, epikateşin, A ve B tipi dimerler, trimerler, tetramerler, pentamerler ve heksamerler olmak üzere prosiyanidinleri tespit etmişlerdir (Jimenez vd., 2020). Yapılan çalışmalarda farklı çeşitlerdeki avokado türlerinin içerdiği biyoaktif maddenin ve miktarının farklı olabileceği görülmüştür. Mesela farklı türlerdeki avokado çekirdeklerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada 'Hass' avokado çeşidinin toplam fenolik madde miktarının (51.6 mgGAE/g) diğer çeşitlerden daha yüksek olduğu bulunmuştur (Jimenez vd., 2020).

Avokado ağacı yapraklarında flavonoid bileşiklerden özellikle; epikateşin, luteolin, kuersetin, rutin bulunduğu bildirilmiştir (Tablo 1). Avokado meyve çekirdeği ve kabuğunda baskın olarak B tipi prosiyanidinler bulunurken avokado ağacının yapraklarında ise C tipi prosiyanidinlerin bulunduğu bildirilmiştir (Yamassaki vd., 2017). Hass ve Fuerte avokado çeşitlerinin meyve eti ve yaprağında bulunan toplam fenolik ve flavonoid madde miktarları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Fuerte avokado çeşidinin yaprağındaki toplam fenolik madde ve toplam flavonoid madde miktarıyla antioksidan kapasitesinin meyve etinden ve Hass çeşidinden daha yüksek olduğu bulunmuştur (Owolabi, Coker ve Jaja, 2010; Murathan ve Kaya, 2020).

Ayrıca avokado yapraklarından izole edilen biyoaktif bileşiklerin sahip oldukları antioksidan aktiviteleri meyvenin farklı kısımlarından elde edilen biyoaktif bileşiklerle karşılaştırıldığında, antioksidan aktivite oranlarının en yüksekten en düşüğe sırasıyla; yaprak> kabuk> meyve eti yağı> meyve eti olduğu bulunmuştur (Owolabi, Coker ve Jaja, 2010; Kumar ve Cumbal, 2016). Dolayısıyla avokado ağacı yapraklarındaki biyoaktif bileşenlerin avokadonun diğer kısımlarına göre daha yüksek antioksidan aktiviteye sahip olduğu görülmektedir.

Avokado meyvesinin kabuğunda, karotenoit bileşiklerden özellikle; β -karoten ve luteinin bulunduğu bildirilmiştir (Tablo 2). 'Nabal' çeşidi avokado meyve kabuğunun ise toplam karotenoit içeriğinin (4 mg/100g) diğer çeşitlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Gross vd., 1973; Jimenez vd., 2020). Ayrıca avokado meyve eti ve kabuğunun benzer oranlarda toplam karotenoit madde içerdiği de görülmektedir (Jimenez vd., 2020).

Avokado çekirdeğinin karotenoit içeriğini tespit eden çalışmaya rastlanmamıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Avokado ağacının yaprağı, meyve eti ve atıklarının (çekirdek ve kabuk) karotenoit içeriği. (Carotenoid content of leaves, fruit flesh and wastes (seed and peel) of avocado tree.)

Meyve Eti	Kabuk	Çekirdek	Yaprak	Referans
Lutein	α-karoten	-	α-karoten	(Monge-Rojas ve Campos, 2011; Kopec vd., 2014; Gross vd., 1973)
Zeaksantin	β-karoten		β-karoten	
α-karoten	Kriptoksantin		γ-karoten	
β-karoten	Lutein		Kriptoksantin	
β-kriptoksantin	cis-Lutein		Lutein	
Neoksantin	Isolutein		cis-Lutein	
Neokrom	Violaxanthin		Isolutein	
lutein-5,6-epoksit	Neoksantin		Violaksantin	
krizantemaksantin			Zeaksantin	
trans- Likopen			Anteroksantin	
cis- Likopen			Neoksantin	
trans β-karoten				
cis β-karoten				
γ-karoten				
cis-Lutein				
Isolutein				
Violaxanthin				

Avokado meyve etinde bulunan karotenoit bileşikler; α-karoten (28.9 µg/100g), β-karoten (139 µg/100g), lutein+zeaksantin (271 µg/100g) ve β-kriptoksantindir (27 µg/100g) (Tablo 2). Ayrıca meyve eti içeriğindeki lutein+zeaksantin ve β-karoten gibi karotenoitlerin antioksidan kapasiteyi arttırdığı bildirilmiştir (Duarte vd., 2016; Yurt ve Büyüktüncer Demirel, 2017). Meyve etinde bulunan β-kriptoksantin provitamin A aktivitesi de gösterdiği rapor edilmiştir (Voutilainen vd., 2006). Avokado meyve etinde ki toplam karotenoit miktarının, 'Ettinger' çeşidinde en yüksek değere sahip olduğu bildirilmiştir (Poovarodom vd., 2010).

Avokado meyvesinin kabuğunda, karotenoit bileşiklerden özellikle; β-karoten ve luteinin bulunduğu bildirilmiştir (Tablo 2). 'Nabal' çeşidi avokado meyve kabuğunun ise toplam karotenoit içeriğinin (4 mg/100g) diğer çeşitlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Gross vd., 1973; Jimenez vd., 2020). Ayrıca avokado meyve eti ve kabuğunun benzer oranlarda toplam karotenoit madde içerdiği de görülmektedir (Jimenez vd., 2020).

Avokado çekirdeğinin karotenoit içeriğini tespit eden çalışmaya rastlanmamıştır (Tablo 2).

Avokado ağacı yaprağının lutein (%51), α-karoten (%16), β-karoten (%11.3) ve neoksantin (%7.5) gibi karotenoitleri içerdiği bildirilmiştir (Tablo 2).

Tablo 3. Avokado ağacının yaprağı, meyve eti ve atıklarının (çekirdek ve kabuk) tokoferol ve sterol içeriği içeriği. (Tocopherol and Sterol content of leaf, pulp and waste (seed and peel) of avocado tree.)

Meyve Eti	Kabuk	Çekirdek	Yaprak	Referans
α-tokoferol	-	Triterpenler	-	(Monge-Rojas ve Campos, 2011; Monika ve Geetha, 2015; Alkhalaf vd., 2019; Leite et al. 2009; Alkhalaf vd., 2019)
γ-tokoferol		β-sitosterol		
δ-tokoferol		Kampesterol		
β-sitosterol		Stigmasterol		
Kampesterol				
Stigmasterol				

Avokado meyve etinde özellikle; α-tokoferol, γ-tokoferol ve δ-tokoferol bulunmaktadır (Tablo 3). Yapılan bir çalışmada 'Hass' avokado çeşidinin meyve etindeki tokoferol miktarları araştırılmış olup γ-tokoferol (199mg/100g) ve δ-tokoferol (60mg/100g)'ün en yüksek değere sahip tokoferoller olduğu bildirilmiştir (Lu vd., 2005; Monge-Rojas ve Campos, 2011). Ayrıca 'Hass' avokado çeşidinin meyve etinde tespit edilen lipid fraksiyonunda fitosterol oranının yüksek olduğu ve major olarak β-sitosterol (%89) içerdiği tespit edilmiştir (Salgado vd., 2008). Ancak avokado meyve etinin hidroalkolik (%70 etanol) ekstraktının daha düşük miktarlarda kampesterol ve stigmasterol içerdiği saptanmıştır (Plaza vd., 2009; Monika ve Geetha, 2015). Yurt ve Büyüktüncer Demirel (2017), meyve etinden fitosterol gibi fitokimyasal ihtiyacının karşılanmasına katkı sağlayabileceği belirtilmiştir.

Tablo 3'te verilen bilgilere göre **avokado çekirdeğinde** tokoferol tespit edilmemiştir ancak sterollerden triterpenler, β-sitosterol, kampesterol ve stigmasterol içerdiği saptanmıştır.

Avokado kabuğu ve yapraklarının tokoferol ve sterol kompozisyonunu tespit eden çalışmaya rastlanmamıştır (Tablo 3).

2.2. Sağlık Üzerine Etkileri (Effects on Health)

Avokado (meyve, yaprak, çekirdek, çiçek ve filizleri) keşfedildiği ve kültüre alındığı günden bu yana Aztekler ve Mayalar dâhil olmak üzere çeşitli toplumlar tarafından gıda ve tıbbi amaçlarla kullanılmaktadır (Gutierrez ve Villanueva, 2007; Alonso-Castro vd., 2012; Jiménez-Arellanes vd., 2013; Abe ve Ohtani, 2013). Avokado meyvesi besin içeriği ve sağlık üzerine yararlı etkilerinden dolayı süper gıda olarak bilinirken (Vinha vd., 2020), yaprakları ise içerdiği fitokimyasallar sebebiyle tıbbi amaçlı kullanılmaktadır (Murathan ve Kaya, 2020).

Avokado yaprak, meyve ile çekirdek ve kabuk gibi meyve atıklarının larvisidal, antifungal, analjezik ve antiinflamatuvar, antimikrobiyal, antimikobakteriyel, antioksidan, antiprotozoal, antidiyabetik, antihipertansif, hipokolesterolemik aktivitelere sahip olduğu Tablo 4, 5, 6, 7, 8'de belirtilen çalışmalarda detaylı olarak sunulmuştur (Adeyemi vd., 2002; Leite vd., 2009; Yasir vd., 2010; Jiménez-Arellanes vd., 2013; Owolabi vd., 2010).

2.2.1. Kardiyovasküler hastalıklar (Cardiovascular Diseases)

Kardiyovasküler hastalıklar (KVH) günümüzde mortalite ve morbiditenin temel nedeni olarak görülmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), uygun önlemler alınmadığı takdirde, 2030 yılına kadar tahminen 23 milyon insanın daha her yıl kalp ve damar hastalıklarına bağlı gelişen kalp krizleri ve inmelere hayatını kaybedeceğini bildirmiştir (WHO, 2017). Polifenollerin serbest radikalleri yakalama aktivitesi yüksek reaktif radikallere bir hidrojen atomunu bağışlamaları sonucunda serbest radikal oluşumunu ve oksidatif stresi önlemesine dayanmakta olup bu özellikleri sayesinde kan basıncını düşürme, endotel fonksiyonunu iyileştirme, damar sistemi üzerinde yararlı etkiler gösterme, trombosit agregasyonunu ve düşük yoğunluklu lipoprotein oksidasyonunu inhibe etme, inflamatuvar yanıtları azaltma, düşük yoğunluklu lipoprotein oksidasyonunu inhibe etme ve inflamatuvar yanıtları azaltma gibi etkileri dolayısıyla kalp hastalıkları riskini etkileyebilmektedirler (Vauzour vd., 2010). Avokado yaprağı, meyve eti ve çekirdeğinin biyoaktif bileşenleri ve tedavi edici uygulamaları Tablo 4'de detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 4. Avokado (*P. americana* Mill.) yaprağı, meyve eti ve çekirdeğinin biyolojik özellikleri ve kardiyovasküler hastalıkları tedavi edici uygulamaları. (Biological properties of avocado (*P. americana* Mill.) leaf, fruit pulp and seed and therapeutic applications in cardiovascular diseases.)

Kullanılan Materyal	Çözgen	İçerik	Etki	Referans
Yaprak	Su Etanol	Kaempferol, fumarik asit kuersetin-3-O-arabinoside, klorojenik asit	Antikolinerjik etki	(Polat Kose vd., 2020)
Yaprak	Su	-	Siçan aort halkaları üzerinde <i>in vivo</i> vazorelaksasyon etki	(Owolabi vd., 2005)
Yaprak	Su Metanol	Metanol özüt: Alkaloidler, kumarinler ve tripperpen glikozitler Sulu özüt: Alkaloidler, katekol, tanenler, saponinler ve flavonoidler	Anestezi uygulanmış normotansif siçanlarda <i>in vivo</i> doza bağlı hipotansif aktivite	(Adeboye vd., 1999)
Yaprak	Hidroalkolik	Tanenler, saponinler, steroidler/triterpenoidler ve flavonoidler (izokersitrin, kuersitrin)	Erkek Wistar siçanlarda <i>in vivo</i> antihiperglisemik etki	(Lima vd., 2012)
Yaprak	Su	-	Hipotansif aktivite	(Brovelli vd., 2005)
Yaprak	Su Metanol	-	Erkek Albino siçanlarda <i>in vivo</i> ateroskleroza karşı koruyucu etki Hipokolesterolemik etki	(Brai vd., 2007)
Yaprak	Su	-	Kobaylarda ve Wistar siçanlarda <i>in vitro</i> ve <i>in vivo</i> bradikardi, vazorelaksasyon ve hipotansiyon etki	(Ojewole vd., 2007)
Yaprak	Su	-	Wistar albino siçanlarda <i>in vitro</i> doku hasarına karşı hepatoprotektif etki	(Brai vd., 2014)
Yaprak	Su	Saponinler, alkaloidler ve terpenoidler	Antikolinesteraz (<i>in vitro</i>) etki	(Oboh vd., 2016)
Meyve eti (Hass çeşidi)	-	β -sitosterol	Wistar siçanlarda <i>in vivo</i> hiperkolesterolemik etki	(Salgado vd., 2008)
Meyve eti	Hidroalkolik	Flavonoidler (Rutin, kuersetin, luteolin), fenolik asitler (Gallik asit, elagik asit, vanilik asit), fitosteroller (β -sitosterol, stigmasterol)	Siçanlarda <i>in vivo</i> hipolipidemik etki	(Monika ve Geetha, 2015)
Meyve eti	Etanol	Alkaloidler, flavonoidler, triterpenoidler, mineraller ve vitaminler gibi biyolojik olarak aktif bileşenler	Diyabetik erkek Wistar albino siçanlarda <i>in vivo</i> anti- hiperglisemik etki Anti-oksidatif etki	(Rao ve Adinew, 2011)
Meyve eti	Hekzan	(2E,5E,12Z,15Z)-1- hidroksihenikoza-2, 5,12, 15-tetraen-4-one; (5E,12Z,15Z)-2-hidroksi-4-oksohenik-5, 12, 15-trien-1-il asetat; (2R,12Z,15Z)-2-hidroksi-4- oksohenik- 12,15-dien-1-il asetat; (2E, 12Z,15Z)-1- hidroksihenikoza-2,12,15-trien-4-one; (5E,12Z)-2-hidroksi-4- oksohenikoza- 5,12-dien-1-yl asetat	Erkek Wistar siçanlarında <i>in vivo</i> karaciğer hasarına karşı koruyucu etki	(Kawagishi vd., 2001)

Tablo 4. Devamı (Continued)

Meyve eti	Metanol Su	-	Anti-lipaz aktivite	(Anbar, 2014)
Çekirdek	Su	Alkaloidler, glikozitler, saponinler, tanenler ve flavonoidler	Alloksan kaynaklı albino Wistar sıçanlarda hipoglisemik etki Doku (pankreas, böbrekler ve karaciğer) koruyucu etki	(Ezejiyor vd., 2013)
Çekirdek (Fuerte çeşidi)	Su	-	Hipertansif albino sıçanlarda <i>in vivo</i> hipokolesterolemik etki	(Imafidon ve Amaechina, 2010)
Çekirdek	Metanol	Protokatekuik asit, klorojenik asit, siringik asit, vanilik asit, rutin, kaempferol, kaempferide	Yetişkin erkek farelerde <i>in vivo</i> hipokolesterolemik etki	(Pahua-Ramos vd., 2012)
Çekirdek	Su	Saponinler, alkaloidler ve terpenoidler	Antikolinesteraz (<i>in vitro</i>) etki	(Obok vd., 2016)
Çekirdek	Metanol Su	-	Anti-lipaz aktivite	(Anbar, 2014)

Avokado meyve etinde bulunan fitokimyasallar sayesinde KVH'lara karşı koruyucu olabilmektedir (Serra-Majem vd., 2006). Kardiyovasküler hastalıkları önleyici ve olası iyileştirici etkisi olduğu ile ilgili yapılan çalışmada, K vitamini içeriğinden dolayı kan pıhtılaşma süresini düzenlediği ve transaminazları azaltması sebebiyle de karaciğer hastalığının tedavisi üzerine olumlu etkisi bulunduğu bildirilmiştir (Gouegni ve Abubakar, 2013). Saf avokado yağı (VAO), insan sağlığına faydalı olan tekli doymamış yağ asitleri (MUFA) ve biyoaktif bileşenlerce zengindir. Yağ biyoaktif bileşenlerden özellikle α -tokoferol ve β -sitosterol içermektedir. Bu özellikler sayesinde hiperkolesterolemik, hipertansiyon, diyabet ve yağlı karaciğer hastalığının tedavisinde fonksiyonel yağ olarak kullanılmasını sağlar. Ayrıca VAO, kardiyometabolik riski azaltır ve antimikrobiyal özelliğe sahiptir (Tan, 2019).

Yüksek potasyum içeriği ve düşük sodyum içeriği sayesinde düşük sodyum diyetleri olan kişiler için kardiyovasküler hastalıklara karşı koruma sağlar (Araújo vd., 2018). Randomize bir klinik çalışma, C vitamini ve E vitamini kombinasyonunun hiperkolesterolemik kişilerde aterosklerotik ilerlemeyi yavaşatabileceği ileri sürülmüştür (Salonen vd., 2003). Los Angeles Ateroskleroz Çalışması, plazma ksantofil seviyesi ile intravasküler kalınlık arasında bir ilişki olduğunu bildirmiştir. Artan ksantofil seviyesi ateroskleroza karşı koruyucu olmaktadır (Hozawa vd., 2007). Hiperkolesterolemik bireylerde diyetle antioksidan bileşiklerin alınımının lipit peroksidasyonunu önleyerek, aterosklerotik sürecin yavaşlamasına önemli katkıda bulunduğu düşünülmektedir (Dreher ve Davenport, 2013).

Avokado meyve etinde yüksek miktarda β -sitosterol gibi fitosterol yapıda lipit fraksiyonları bulunmaktadır ve avokadonun fitosterol içeriğinin de lipit profilinin düzenlenmesinde etkili rol oynamaktadır. Fitosterollerin, plazma HDL kolesterol düzeyi ve kan basıncını etkilemeden, plazma toplam kolesterol ve LDL kolesterol düzeylerini düşürebildiği bilinmektedir (Lottenberg vd., 2002; Brufau vd., 2008). Avokado meyve eti, hücre zarlarında ve tekli doymamış yağ asitlerinde, istenmeyen düşük yoğunluklu lipoprotein (LDL) kan seviyelerini düşürmede ve yararlı yüksek yoğunluklu lipoprotein (HDL) seviyelerini arttırmada etkilidir. Avokado çekirdeği ununun hiperkolesterolemik fareler modelinde düşük toksisiteye ve düşük kolesterol ve düşük yoğunluklu lipoprotein kolesterolüne sahip olduğu bildirilmiştir (Araújo vd., 2018).

Pahua-Ramos ve arkadaşları (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, avokado çekirdeği unu metanol ekstraktı hiperkolesterolemik farelerde toplam kolesterol ve LDL seviyelerini önemli ölçüde azaltmıştır. Ulusal Sağlık ve Beslenme Anketi (NHANES (National Health and Nutrition Examination Survey)) 2001-2008 çalışmasına göre, avokado tüketen bireylerin diyet kalitesinin ve HDL kolesterol düzeylerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Günlük diyete eklenen 68g avokadodan alınan lutein ve zeaksantin biyoaktif bileşenlerinin metabolik sendroma karşı koruyucu olabileceği bildirilmiştir (Fulgoni vd., 2013). Nijerya'da, avokado çekirdeğinin tozu, kronik hipertansiyonun tedavisinde yararlı olduğuna inanılarak çorbalara ve pudinglere ilave edilmektedir (Dreher ve Davenport, 2013). Avokado çekirdeği, yüksek çözünmez lif fraksiyonu, bağırsak geçişi, safra asidi tutma ve kolesterolün düşürülmesi gibi fizyolojik etkiler sağlayabilmektedir (Barbosa-Martín vd., 2016).

Avokado ağacının yaprakları da hipertansiyon tedavisinde kullanılan bitkisel gıdalardan biridir (Irawati, 2015). 'Fuerte' avokado türünün yaprak ve çekirdek sulu özütleri ile yapılan bir çalışmada; sıçanlarda tüm doz seviyelerinde kan basınçlarını düşürmesine rağmen, hipertansiyon tedavisinde çekirdek kullanımı doza bağlı olmalıdır çünkü yüksek konsantrasyonlar kolesterol seviyesinde artışa neden olabilmektedir (Imafidon ve Amaechina, 2010).

Avokadolar orta enerji yoğun bir meyvedir, çünkü avokado meyve etinin yaklaşık % 80'i su (% 72) ve diyet lifinden (% 6,8) oluşur ve kilo kontrolü üzerinde az yağlı meyve ve sebzeler gibi benzer etkilere sahip olduğu bildirilmiştir (Dreher ve Davenport, 2013). Avokado meyve çekirdekleri potansiyel bir alternatif lif kaynağıdır. Bu onları diyet lifi gibi bitkisel yan ürünlere yönelik uygulamaların belirlenmesinde çalışmaya aday yapar. Diyet lifi, insanlarda erken doyma da dâhil olmak üzere bir takım biyolojik etkileri bildirmiştir; safra asitlerinin alıkonması/atılımı; gastrointestinal müshil; hipoglisemi; hipokolesterolemik; diğerlerinin yanı sıra prebiyotik ve kardiyoprotektif

özellikler de bildirilenler arasındadır (Barbosa-Martín vd., 2016). Avokado çekirdeği ile ilgili başka bir çalışmada, yüksek çözünmez lif fraksiyonu, bağırsak geçişi, safra asidi tutma ve kolesterolün düşürülmesi gibi fizyolojik etkiler sağlayabilir (Barbosa-Martín vd., 2016). NHANES 2001-2006'daki yetişkin verilerinin analizi, avokado tüketicilerinin tüketmeyenlerden daha yüksek HDL-kolesterol, daha düşük metabolik sendrom riski ve daha düşük ağırlık, vücut kütle indeksi ve bel çevresine sahip olduğunu göstermektedir (Dreher ve Davenport, 2013).

2.2.2. Diyabet (Diabetes)

Uluslararası diyabet federasyonu diyabet hastalığının görülme oranının çok hızlı bir artış gösterdiğini ve diyabetli hastaların %90'nın tip-2 diyabetli olduğunu raporlamışlardır (Dabaghian vd., 2012). Ayrıca diyabet tedavisinde kullanılan kimyasal ilaçların yan etkilerinden dolayı Amerika'da 3,6 milyon diyabet hastasının tedavi için bitkisel kaynaklı ürünleri tercih ettiği bildirilmiştir (Dabaghian vd., 2012). Karbonhidratların monosakkaritlerine kadar parçalanmasını sağlayan; tükrükte bulunan α -amilaz ve ince bağırsakta bulunan sindirim enzimleri (α -glukozidaz: sükröz, maltaz, izomaltaz) aktivitelerinin bitkisel kaynaklı biyoaktif bileşenler varlığında durması/yavaşlaması sonucunda kana geçen monosakkarit miktarı azalmaktadır (Villa vd., 2017). Tablo 5'te avokado yaprağı, meyve eti, meyve kabuğu ve çekirdeğinin biyoaktif bileşenleri ve tedavi edici uygulamaları detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 5. Avokado (*P. americana* Mill.) yaprağı, meyve eti, meyve kabuğu ve çekirdeğinin biyolojik özellikleri ve antidiyabetik uygulamaları. (Biological properties and antidiabetic applications of avocado leaf, fruit pulp, fruit peel and seed.)

Kullanılan Materyal	Çözgen	İçerik	Etki	Referans
Yaprak	Hekzan Diklorometan Etil asetat Aseton Etanol Metanol,Su	-	Erkek Sprague-Dawley sıçanlarda antidiyabetik <i>in vivo</i> aktivite	(Makopa vd., 2020)
Yaprak	Su Metanol	-	Erkek Albino sıçanlarda <i>in vivo</i> Hipoglisemik etki	(Brai vd., 2007)
Yaprak	Su	Siringik asit, eugenol, vanilik asit, izoeugenol, gayakol, fenol, kaemferol, kateşin, P-hidroksibenzoik asit, ferulik asit, apigenin, naringenin, epigallokateşin, epikateşin, lupeol, epigallokateşin-3-O-gallat	Antidiyabetik aktivite	(Isaac vd., 2014)
Yaprak	Metanol	Siringik asit, öjenol, vanilik asit, kaempferol, kateşin, epikateşin, ferulik asit, apigenin, naringenin, lupeol, epigallokateşin ve epigallokateşin 3-O-gallat	Antidiyabetik (<i>in vitro</i>) aktivite	(Obboh vd., 2014)
Meyve eti	Etanol	-	Erkek Wistar albino sıçanlarda <i>in vivo</i> antidiyabetik etki	(Rao, 2017)
Meyve eti	Su	Siringik asit, eugenol, vanilik asit, izoeugenol, gayakol, fenol, kaemferol, kateşin, P-hidroksibenzoik asit, ferulik asit, apigenin, naringenin, epigallokateşin, epikateşin, lupeol, epigallokateşin-3-O-gallat	Sıçan pankreası üzerinde <i>in vitro</i> antidiyabetik aktivite	(Isaac vd., 2014)
Meyve eti	Metanol	Siringik asit, öjenol, vanilik asit, kaempferol, kateşin, epikateşin, ferulik asit, apigenin, naringenin, lupeol, epigallokateşin ve epigallokateşin 3-O-gallate	Antidiyabetik (<i>in vitro</i>) aktivite	(Obboh vd., 2014)
Meyve kabuğu	Su	Siringik asit, eugenol, vanilik asit, izoeugenol, gayakol, fenol, kaemferol, kateşin, P-hidroksibenzoik asit, ferulik asit, apigenin, naringenin, epigallokateşin, epikateşin, lupeol, epigallokateşin-3-O-gallat	Sıçan pankreası üzerinde <i>in vitro</i> antidiyabetik aktivite	(Isaac vd., 2014)
Meyve kabuğu	Metanol	Siringik asit, öjenol, vanilik asit, kaempferol, kateşin, epikateşin, ferulik asit, apigenin, naringenin, lupeol, epigallokateşin ve epigallokateşin 3-O-gallate	Antidiyabetik (<i>in vitro</i>) aktivite	(Obboh vd., 2014)
Çekirdek	Su	-	Albino Wistar sıçanları üzerinde <i>in vivo</i> antidiyabetik aktivite	(Alhassan vd., 2012)
Çekirdek	Su	-	Yetişkin erkek tavşanlarda <i>in vivo</i> antihiperglisemik etki	(Alarcon-Aguilara vd., 1998)
Çekirdek	Su	-	Erkek Wistar albino sıçanlarda <i>in vivo</i> hipoglisemik etki	(Edem vd., 2009)
Çekirdek	Su	Siringik asit, eugenol, vanilik asit, izoeugenol, gayakol, fenol, kaemferol, kateşin, P-hidroksibenzoik asit, ferulik asit, apigenin, naringenin, epigallokateşin, epikateşin, lupeol, epigallokateşin-3-O-gallat	Sıçan pankreası üzerinde <i>in vitro</i> antidiyabetik aktivite	(Isaac vd., 2014)
Çekirdek	Metanol	Siringik asit, öjenol, vanilik asit, kaempferol, kateşin, epikateşin, ferulik asit, apigenin, naringenin, lupeol, epigallocatechin ve epigallocatechin3-O-gallate	Antidiyabetik (<i>in vitro</i>) aktivite	(Obboh vd., 2014)

Makopa ve arkadaşları (2020) avokado yapraklarının metanol ekstraktlarının diyabeti önleme yolu olarak kullanımını doğrulamak için α -glukozidaz aktivitesi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Metanol ekstraktların erkek Sprague-Dawley sıçanlarında, α -glukozidaz enziminin aktivitesini inhibe ettiğini tespit etmişlerdir. Brai ve arkadaşları (2007) tarafından benzer şekilde hiperkolestrolemik albino sıçanların ise avokado yapraklarının metanol ve sulu ekstraktları (10 mg/vücut ağırlığı) ile beslediği bir diğer araştırmada hem sulu hem de metanol yaprak ekstraktının sıçanlardaki plazma glikoz ve toplam kolesterol seviyelerini düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Avokado yaprakları ile birlikte meyve eti ve atıklarının (çekirdek ve kabuk) metanol ekstraktlarının α -amilaz ve α -glukozidaz enzimleri üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda tüm ekstraktların iki enzimi de doza bağlı olarak durdurdukları tespit edilmiştir. Fakat avokado yaprakları ve meyve kabuğu ekstraktlarının α -amilaz ve α -glukozidaz enzimlerini durdurucu etkilerinin çekirdek ve meyve etinden daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir (Obob vd., 2014). Yapılan hayvan çalışmalarının yanında; halk arasında avokado çekirdeğinin geleneksel olarak diyabet hastalığı tedavisinde de kullanıldığı bildirilmiştir (Zakariya vd., 2016).

2.2.3. Kanser (Cancer)

Kanser, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde önde gelen ölüm nedenlerinden biridir (Fitzmaurice vd., 2015). Dünya Sağlık Örgütü'ne (DSÖ) ait veriler, 2018 yılı itibari ile dünya genelinde 18,1 milyon yeni kanser vakası teşhis edildiğini ve kansere bağlı ortalama 600.000 ölüm gerçekleştiğini göstermektedir (Uçak ve Kızıltan, 2021). Epidemiyolojik çalışmalar, yüksek antioksidan içeren sebze ve meyve tüketiminin bazı kanser türlerinin riskini azalttığını belirlemiştir (Ding vd., 2007). Biyoaktif bileşenlerin hayvan ve hücre modelleri kullanılarak kanser hastalıkları üzerine etkisi farklı etki mekanizmalarıyla açıklanmaktadır. Özellikle biyoaktif bileşenlerinden polifenollerin serbest radikalleri bağlama kapasitesi, diğer reaktif oksijen türlerine karşı antioksidan etki göstermesi, demiri indirgeme gücü ve tümör hücrelerinin çoğalmasını sağlayan enzimleri baskılama kapasitesinin kanser riskini azalttığı bildirilmiştir (Basli vd., 2017).

Avokado yaprağı, meyve eti, meyve kabuğu ve çekirdeğinin biyolojik özellikleri ve tedavi edici uygulamaları Tablo 6'da detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 6. Avokado (*P. americana* Mill.) yaprağı, meyve eti, meyve kabuğu ve çekirdeğinin biyolojik özellikleri ve kanser üzerine tedavi edici uygulamaları. (Biological properties of avocado leaf, fruit pulp, fruit peel and seed and therapeutic applications on cancer.)

Kullanılan Materyal	Çözgen	İçerik	Etki	Referans
Yaprak	-	Persin	Emziren fare göğüs epitelyumunda <i>in vivo</i> G2-M hücre döngüsü tutuklama ve kaspaz-bağımlı apoptozu indükleyici aktivite İnsan göğüs kanseri hücre hattında <i>in vitro</i> Bim'e bağlı sitostatik ve sitotoksik etki	(Butt vd., 2006)
Yaprak	-	Persin	İnsan göğüs kanseri hücre hattında <i>in vitro</i> antikanser etki	(Roberts vd., 2007)
Yaprak	Etil alkol	-	Larinks kanseri dokularında <i>in vitro</i> Adenozin Deaminaz (ADA) üzerine aktive edici etki	(Ant vd., 2017)
Meyve eti (Hass çeşidi)	Aseton	Alifatik Asetojenler: (2S,4S)-2, 4-dihidroksiheptadek-16-enil asetat ve (2S,4S)-2,4-dihidroksiheptadek-16-inil asetat.	Premalign ve malign insan ağız epitel hücre hatları üzerinde <i>in vitro</i> antikanser etki	(D'Ambrosio vd., 2011)
Meyve eti	Etanol Kloroform Etil asetat Petrol eter	-	Özofagus skuamöz hücreli karsinom ve kolon adenokarsinom hücre hatları üzerinde <i>in vitro</i> antikanser etki	(Larijani vd., 2014)
Meyve eti (Hass çeşidi)	Aseton	Karotenoidler: Lutein, zeaksantin, β -kriptoksantin, α -karoten, β -karoten. E vitamini: α -tokoferol ve γ -tokoferol.	İnsan prostat hücre hatları (LNCaP ve PC3) üzerinde <i>in vitro</i> prostat kanserinin inhibisyonu	(Lu vd., 2005)
Meyve eti (Hass çeşidi)	Kloroform	-	İnsan ağız epitel hücre hatları üzerinde <i>in vitro</i> antikanser etki	(Ding vd., 2009)
Meyve eti	Kloroform/ Metanol	Kampesterol, stigmasterol, β - sitosterol	Kolon hücre hattı (HCT116) ve karaciğer hücre hattı (HePG2) üzerinde <i>in vitro</i> antikanser etki	(Alkhalaf vd., 2019)
Meyve kabuğu	-	Prosiyanidin	İnsan melanoma B16F10 hücre hattı üzerinde <i>in vitro</i> antikanser etki	(Cerde-Opazo et al. 2021)
Çekirdek	Kloroform Metanol	-	MCF-7 hücre hatlarına karşı <i>in vitro</i> antiproliferatif etki	(Widiyastuti vd., 2018)
Çekirdek	Kloroform/ Metanol	Kampesterol, stigmasterol, β - sitosterol	Kolon kanseri hücre hattı ve karaciğer kanseri hücre hattı üzerinde <i>in vitro</i> antikanser etki	(Alkhalaf vd., 2019)

Avokado tüketiminin kanserden olası koruyucu etkisi *in vitro* çalışmalarla sınırlıdır. Yapılan bu çalışmalar, avokado meyve eti ekstraktlarının antikanser özellikte olduğunu bildirmektedir. Bildirilen bu aktiviteler, farklı tedaviler için geri kazanılabilen ve uygulanabilen önemli biyoaktif bileşenler içerdiğini göstermektedir (Lee vd., 2008). Avokado meyvesinden elde edilen fitokimyasalların, kanser hücresi döngüsünü seçici olarak durdurup, büyümesini inhibe edebileceğini ve bazı tanımlanmış kanser hücre tiplerinde (ağız, akciğer, karaciğer, kolon ve göğüs, prostat) apoptozu artırabileceğini farklı çalışmalar da gösterilmiştir (Ding vd., 2007; García-Aguirre vd., 2008; Imafidon ve Amaechina, 2010; D'Ambrosio vd., 2011; Khalifa vd., 2013; Dreher ve Davenport, 2013). Ayrıca

avokado meyve etinde bulunan luteinin, prostat kanser hücrelerinin büyümesini baskılayarak tümör oluşumunu engellediği tespit edilmiştir (Lu vd., 2005). Benzer şekilde meyve etindeki karotenoit maddelerin de kanser riskinin azaltılmasında önemli rol oynadığı bildirilmiştir (Ozolua vd., 2009). Meyve etinde bulunan β -sitosterollerin lenfositlerin çoğalmasını sağlayarak doğal öldürücü hücre aktivitesini artırıp; kanser, HIV ve enfeksiyon oluşumu gibi bağışıklığa bağlı hastalıkların tedavisinde kullanımının olumlu etkileri olduğu rapor edilmiştir (Bouic, 2002; Dreher ve Davenport, 2013). Yakın zamanda yapılan bir başka araştırma ise avokado mezokarpından kloroform kullanılarak izole edilen iki alifatik asetojenenin, insan ağız kanseri hücre dizisi 83-01-82CA'nın çoğalmasını inhibe ettiğini göstermiştir (Araújo vd., 2018).

Meyve etinin yanı sıra avokado ağacının yaprakları ve meyve atıklarından (çekirdek ve kabuk) elde edilen ekstratların da antikanser aktiviteye sahip olduğu bildirilmiştir (Ant vd., 2017). Hüresel analizler, avokado kabuklarından üretilen prosiyanidin açısından zengin bir öze (Proc-Nem) yüklü bir nanoemülsiyonun (Proc-Nem) kanserli olmayan insan hücrelerinde (HEK293) güvenli bir bileşen olduğunu ve kanser hücrelerinde (melanoma B16F10 hücreleri) ise sitotoksisite göstererek tümör oluşumunu engeldiğini tespit etmişlerdir. Dolayısıyla avokado kabuğunun gelecek vaat eden bir Prosiyanidin (Proc) kaynağı olduğunu bildirmişlerdir (Cerde-Opazo vd., 2021). Avokado çekirdeğinin ise kemirgenlerde antitümör aktivitesine sahip olduğu bildirilmiştir (Boulton vd., 2004). Son yapılan çalışmalarda avokado çekirdeklerinin metanolik ve etanolik ekstratlarının göğüs ve karaciğer hücrelerine karşı etkisi MDA-MB-231 hücreleri kullanılarak araştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre metanolik ekstratın MDA-MB-231 hücrelerinin apoptozunun indüklenmesi yoluyla antikanser aktivitesi oluşturduğu bildirilirken, etanolik ekstratın zengin triterpenoid içeriğinden dolayı göğüs ve karaciğer hücrelerine karşı belirgin sitotoksik aktivite gösterdiği tespit edilmiştir (Araújo vd., 2018).

2.2.4 Antioksidan, Antiinflamatuvar ve Antimikrobiyal Aktivite (Antioxidant, Anti-Inflammatory and Antimicrobial Activity)

Antioksidan, antiinflamatuvar ve antimikrobiyal aktiviteye başta fenolik bileşikler olmak üzere, tokoferoller, karotenoitler ve benzeri diğer bileşenler katkı sağlamaktadır. Avokadoda bulunan tokoferoller, karotenoitler, fenolik bileşikler ve steroller avokadonun toplam antioksidan kapasitesini desteklemektedirler (Ding vd., 2007; Dreher ve Davenport, 2013). Ayrıca, avokadonun fenolik bileşikler gibi hidrofilik antioksidanlar ve karotenoitler gibi lipofilik antioksidanlar bakımından zengin olduğu bildirilmiştir (Ding vd., 2007). Lipofilik antioksidanların hücre membranına tutunma özelliği hidrofilik antioksidanlara göre daha çoktur, bu nedenle de biyoyararlılıkları daha yüksektir (Rodríguez-Sánchez vd., 2013). Polifenollerin antioksidan ve anti-inflamatuar aktiviteleri büyük ölçüde kimyasal yapılarına atfedilmiştir ve yüksek reaktif radikallere bir hidrojen atomunu bağışlamaları sonucunda serbest radikal oluşumunu ve oksidatif stresi önlemesine bağlı olarak antioksidan ve anti-inflamatuar aktiviteleri oluşmaktadır (Kesavan vd., 2018). Ayrıca bu bileşiklerin antioksidan ve anti-inflamatuar etkilerinin mekanizmalarının genel olarak serbest radikalleri temizleme, antioksidan enzim aktivitelerini geri yükleme ve sitokin kaynaklı inflamasyonu düzenleme yeteneklerinden kaynaklandığı da bildirilmiştir (Zhang ve Tsao., 2016). Polifenollerin antimikrobiyal özellikleri; biyofilm oluşumunun inhibisyonu, konak ligandlarının yapışmasının azaltılması ve bakteriyel toksinlerin nötralizasyonunu baskılama etki göstermesine dayanmaktadır. Bu mekanizma yüksek protein bağlanma afinitesine sahip fenolik hidroksil gruplarının, mikrobiyal enzimleri inhibe etmesine ve aynı zamanda sitoplazmik membranlara afiniteyi artırmasına bağlı olarak oluşmaktadır (Miklasińska-Majdanik vd., 2018). Avokado yaprağı, meyve eti, meyve kabuğu ve çekirdeğinin biyolojik özellikleri ve tedavi edici uygulamaları Tablo 7'de detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 7. Avokado (*P. americana* Mill.) yaprağı, meyve eti, meyve kabuğu ve çekirdeğinin biyolojik özellikleri ve antioksidan, antiinflamatuvar ve antimikrobiyal aktiviteleri (Biological properties and antioxidant, anti-inflammatory and antimicrobial activities of avocado leaf, fruit pulp, fruit peel and seed.)

Kullanılan Materyal	Çözgen	İçerik	Etki	Referans
Yaprak	Su Etanol	Kaempferol, fumarik asit kuersetin-3-O-arabinoside, klorojenik asit	Antioksidan aktivite	(Polat Kose vd., 2020)
Yaprak	Hidroalkolik	Kuersetin, rutin, luteolin, izorhamnetin, apigenin	Antioksidan aktivite	(Owolabi vd., 2010)
Yaprak	Hekzan Diklorometan Etil asetat Aseton Etanol Metanol Su	-	<i>K. pneumonia</i> ve <i>S. epidermidis</i> 'e karşı antibakteriyel aktivite <i>C. albicans</i> and <i>C. tropicalis</i> 'e karşı antifungal aktivite	(Makopa vd., 2020)
Yaprak	Hidroalkolik	-	Albino Wistar sıçanlarında X-ışını radyasyonuna karşı antiinflamatuvar aktivite Anti-klastrojenik etki Antijenotoksik etki	(Kumar vd., 2017)
Yaprak	Su	Flavonoidler, alkaloidler, indirgeyici şekerler, tanenler ve saponinler	Analjezik (<i>in vivo</i>) etki Antiinflamatuvar (<i>in vivo</i>) aktivite	(Adeyemi vd., 2002)

Tablo 7. Devamı (Continued)

Yaprak	Etanol	Flavonoidler (Kaempferol 3-O- α -D-arabinopyranoside, afzelin, kuersetin-3-O- α -D-arabinopyranosid, kuersitrin, kuersetin 3-O- β -glukopiranozid, kuersetin) ve klorojenik asit	<i>In vitro</i> herpes simpleks virüsü tip 1, Aujeszky hastalığı virüsü ve adenovirüs tip 3 üzerine antiviral aktivite	(De Almeida vd., 1998)
Yaprak	Metanol	Alkaloidler, terpenler ve kinonlar, flavonoidler ve saponinler	<i>T. cruzi</i> 'nin epimastigot formuna karşı <i>in vitro</i> tripanosidal aktivite.	(Molina-Garza vd., 2014)
Yaprak (Hass çeşidi)	Hidroalkolik	B-tipi trimer prosiyanidin, kuersetin-O-glukuronid, kuersetin-O-heksosit, B-tipi dimer prosiyanidin, kafeik asit ve klorojenik asit.	Antioksidan aktivite	(Jiménez vd., 2017)
Yaprak	Hidroalkolik	Fenolik Asitler (5-hidroksiferulik asit, p-kumarik asit, trans-sinamik asit, dihidroksibenzoik asit, dimetil ellajik asit, kafeik asit) ve flavonoidler (prosiyanidin trimer A, prosiyanidin dimer B, kateşin, kuersetin, rutin)	Antioksidan aktivite	(Castro-López vd., 2019)
Yaprak	Su	Saponinler, alkaloidler ve terpenoidler	Antioksidan (<i>in vitro</i>) aktivite	(Oboh vd., 2016)
Meyve eti (Ettinger çeşidi)	Metanol Su Aseton Hekzan	Fenolik asitler (Protokateşik asit, p-hidroksibenzoik asit, m- hidroksibenzoik asit, vanilik asit, kafeik asit, ferulik asit, sinapik asit, anisik asit, kuersetin ve apigenin), flavonoidler, flavanoller ve tanenler	Antioksidan aktivite	(Poovarodom vd., 2010)
Meyve eti (Hass ve Fuerte çeşidi)	Metanol	Karotenoidler, flavonoidler ve fenolik asitler	Antioksidan aktivite	(Murathan ve Kaya, 2020)
Meyve eti	Etil asetat	Avokadenol A, avokadenol B, (2R,4R)-1,2,4-trihidroksinonadekan ve (2R,4R)-1,2,4-trihidroksiheptadek-16-en	<i>M. tuberculosis</i> 'e karşı <i>in vitro</i> antimikobakteriyel aktivite	(Lu vd., 2012)
Meyve eti	-	Defensin PaDef cDNA (Antimikrobiyal peptit)	Sığır endotel hücre hattı üzerinde <i>in vitro</i> <i>E. coli</i> ve <i>S. aureus</i> 'a karşı antibakteriyel aktivite	(Guzmán-Rodríguez vd., 2013)
Meyve eti	Su	-	Mantar patojeni <i>C. gloeosporioides</i> 'e karşı antifungal aktivite	(Domergue vd., 2000)
Meyve eti (Hass ve Fuerte çeşidi)	Etil asetat Aseton Metanol	Hidroksibenzoik asit, hidroksisinamik asit ve prosiyanidinler.	<i>In vitro</i> gram pozitif bakterilere karşı orta derecede antimikrobiyal aktivite Antioksidan aktivite	(Rodríguez-Carpina vd., 2011)
Meyve eti (Hass ve Fuerte çeşidi)	Metanol	Karotenoidler flavonoidler ve fenolik asitler	Antioksidan aktivite	(Murathan ve Kaya, 2020)
Meyve eti	Petrol eter Etanol: su	-	Antioksidan aktivite	(Soong ve Barlow, 2004)
Meyve eti	Kloroform/ Metanol	Kampesterol, stigmasterol, β - sitosterol	Antiinflamatuvar (<i>in vitro</i>) aktivite Antioksidan aktivite	(Alkhalaf vd., 2019)
Meyve eti (Ettinger çeşidi)	Etanol Aseton Hekzan	Polihidroksile yağ alkolleri (PFA)	İnsan derisi hücreleri üzerinde <i>in vitro</i> antiinflamatuvar aktivite	(Rosenblat vd., 2011)
Meyve kabuğu (Hass çeşidi)	Aseton Su	Kateşinler, hidroksisinamik asit, flavanoller and prosiyanidinler	Antioksidan aktivite	(Utrera vd., 2012)
Meyve kabuğu	Etil asetat Metanol Petrol eteri	Metanol özüt: 1,2,4-trihidroksiheptadek-12,16-diyne Etil asetat özüt: 1,2,4-trihidroksiheptadek-16-yne-18-ene	Antioksidan (<i>in vitro</i>) aktivite	(Antasias ti vd., 2017)
Meyve kabuğu	Metanol	-	Antioksidan aktivite	(Rotta vd., 2016)
Meyve kabuğu (Hass çeşidi)	Su n-Hekzan	Prosiyanidinler ve flavan-3-ol	<i>Helicobacter pylori</i> üreazı inhibe edici etki	(Chávez vd., 2011)
Meyve kabuğu (Hass ve Fuerte çeşidi)	Etil asetat Aseton Metanol	Kateşin, prosiyanidinler ve hidroksinamik asitler	Gram pozitif bakterilere karşı <i>in vitro</i> antimikrobiyal etki Antioksidan aktivite	(Rodríguez-Carpina vd., 2011)
Meyve kabuğu (Hass çeşidi)	Hidroalkolik	Flavan-3-ol ((epi)kateşin türevleri), flavonoid (kersetin, kaempferol ve izorhamnetin glikozit türevleri) ve fenolik asit (klorojenik ve kumarik asit türevleri)	Antifungal aktivite Antioksidan aktivite Gram pozitif ve gram negatif bakterilere karşı antibakteriyel aktivite	(Melgar vd., 2018)
Meyve kabuğu (Hass ve Fuerte çeşidi)	Etanol/Su	Kateşin, epikateşin, prosiyanidin B1, prosiyanidin B2 ve trans-5-O-kafeoil-D-kinik asit	Antioksidan aktivite Antiinflamatuvar aktivite	(Tremocoldi vd., 2018)

Tablo 7. Devamı (Continued)

Çekirdek (Hass çeşidi)	Aseton Etanol	Fenolik asitler, prosiyanidin dimer B ve trimer A ve B, kateşin, epikateşin ve perseitol.	Antioksidan (<i>in vitro</i>) aktivite	(Araújo vd., 2020)
Çekirdek	Su	-	Antioksidan aktivite	(Segovia vd., 2016)
Çekirdek	Metanol Kloroform Petrol eter	-	<i>C. neoformans</i> 'a karşı <i>in vitro</i> antifungal aktivite <i>C. neoformans</i> , <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>M. intracellulare</i> ve <i>A. fumigatus</i> 'a karşı <i>in vitro</i> antimikrobiyal aktivite	(Falodun vd., 2014)
Çekirdek	Su	-	<i>A. niger</i> , <i>A. fumigatus</i> , <i>F. oxysporum</i> patojenlerine karşı antimikrobiyal aktivite Antioksidan aktivite	(Rajeshkumar ve Rinitha, 2018)
Çekirdek	Kloroform Etanol	-	Metisiline dirençli <i>S. aureus</i> 'a karşı <i>in vitro</i> antimikrobiyal aktivite <i>E. histolytica</i> ve <i>G. lamblia</i> 'ya karşı <i>in vitro</i> antiprotozoal aktivite <i>M. tuberculosis</i> ilaca dirençli türlere karşı <i>in vitro</i> antimikobakteriyel aktivite	(Jiménez-Arellanes vd., 2013)
Çekirdek (Hass çeşidi)	Aseton	persenon-C, persenon-A, persin, persenon-B	<i>C. sporogenes</i> endospor çimlenmesi ve vejetatif hücre büyümesine <i>in vitro</i> antimikrobiyal aktivite	(Rodríguez-Sánchez vd., 2013)
Çekirdek (Hass çeşidi)	Su Metanol	-	Uyarılmış makrofaj hücrelerinde <i>in vitro</i> antiinflamatuvar etkileri.	(Dabas vd., 2019)
Çekirdek	Hekzan Metanol	Metanol özüt: Flavonoidler, antosiyaninler, yoğunlaştırılmış tanenler, alkaloidler ve triterpenler Heksan özüt: Steroller (β -sitosterol) ve triterpenler	<i>Candida</i> spp., <i>C. neoformans</i> ve <i>M. pachydermatis</i> . <i>Candida</i> spp., <i>C. neoformans</i> ve <i>M. Pachydermatis</i> ' karşı <i>in vitro</i> antifungal aktivite	(Leite vd., 2009)
Çekirdek (Hass ve Fuerte çeşidi)	Etil astat Aseton Metanol	Kateşin, prosiyanidinler ve hidroksinnamik asitler	Gram pozitif bakterilere karşı <i>in vitro</i> antimikrobiyal aktivite Antioksidan aktivite	(Rodríguez-Carpina vd., 2011)
Çekirdek (Hass çeşidi)	Hidroalkolik	Flavan-3-ol ((epi)kateşin türevleri), flavonoid (kersetin, kaempferol ve isorhamnetin glikozit türevleri) ve fenolik asit (klorojenik ve kumarik asit türevleri)	Antibakteriyel aktivite Antifungal aktivite Antioksidan aktivite	(Melgar vd., 2018)
Çekirdek	Petrol eter Hidroalkolik	-	Antioksidan aktivite	(Soong ve Barlow, 2004)
Çekirdek	Kloroform/ Metanol	Kampesterol, stigmasterol, β - sitosterol	Antioksidan aktivite <i>In vitro</i> kolon kanseri hücre hattı ve karaciğer kanseri hücre hattı karşısında antiinflamatuvar aktivite	(Alkhalaf vd., 2019)
Çekirdek (Ettinger çeşidi)	Etanol Aseton Hekzan	Polihidroksile yağ alkollerini (PFA)	İnsan derisi hücrelerinde <i>in vitro</i> antiinflamatuvar aktivite	(Rosenblat vd., 2011)
Çekirdek	Su	Saponinler, alkaloidler ve terpenoidler	Antioksidan (<i>in vitro</i>) aktivite	(Obob vd., 2016)
Çekirdek (Hass ve Fuerte çeşidi)	Etanol/Su	Kateşin, epikateşin, prosiyanidin B1, prosiyanidin B2 ve trans-5-O-kafeoil-D-kinik asit	Antioksidan (<i>in vitro</i>) aktivite Antiinflamatuvar (<i>in vitro</i>) aktivite	(Tremocoldi vd., 2018)

Avokado çekirdekleri ile yapılan *in vitro* çalışmalar, çekirdeğin tanen ve polifenol içerdiğinden dolayı meyve etinden ve sentetik antioksidanlardan daha fazla antioksidan aktiviteye sahip olduğunu göstermiştir (Rodríguez-Carpina vd., 2011). Yapılan bir başka çalışmada avokado çekirdeklerinde *in vitro* çalışma ile metanol ve hekzan ekstraktlarının antifungal ve larvisidal aktivitelerini incelediler ve hekzan ekstraktında β -sitosterol varlığında yüksek larvisidal etki gösterdiği sonucuna vardılar (Jiménez-Arellanes vd., 2013). Ayrıca Tablo 1'de açıklanan fenolik bileşen içerikleri ile ilgili çalışmalarda doğal antioksidan ve sağlığa faydalı bileşikler içerdiği için avokado yaprağının da antioksidan olarak kullanılabilceği önerilmiştir (Kumar ve Cumbal, 2016). Bunun yanında farklı çözümlerin kullanıldığı fenolik bileşen ekstraksiyonunda yaprakta bulunan kuersetin ve flavonoidlerin antioksidan aktiviteyi artırıcı etkileri bulunduğu saptanmıştır (Polat Kose vd., 2020). Yapılan bir diğer çalışmada meyve etinden fenoliklerin ekstraksiyonun da kloroform/metanol kullanılarak Kampesterol, stigmasterol, β -sitosterol ekstrakte edilmiştir (Alkhalaf vd., 2019). Elde edilen ekstraktın antioksidan ve antiinflamatuvar aktivitesinin Murathan ve Kaya (2020)'nin yapmış olduğu metanol ekstraksiyonuyla elde ettiği karotenoitler flavonoidler ve fenolik asitler içeren ekstraktan daha düşük olduğu saptanmıştır. Çekirdekten fenolik bileşiklerin ekstraksiyonunda etanol, metanol, petrol eter ve hidroalkolik gibi çözümler kullanılmış olup, elde edilen ekstraktların antibakteriyel, antifungal ve antioksidan aktiviteye sahip oldukları görülmüştür (Melgar vd., 2018).

2.2.5 Hastalıkları Tedavi Edici Diğer Uygulamaları (Other Applications for Treating Diseases)

Avokadonun özellikle yaprak ve meyve etinin anti-diyare, anti-ülser, anti-depresan, oksidatif strese karşı koruyuculuk gibi etkileri olduğu yapılan *in vivo* ve *in vitro* çalışmalarla kanıtlanmıştır (Odo vd., 2014; Oluwole vd., 2011; Holst ve Williamson, 2008; Ortega-Arellano vd., 2019). Bitkisel kaynaklı biyoaktif bileşenlerin su emilimini uyarma, elektrolit salgılanması (Na⁺, K⁺, vb.) ve bağırsak hareketliliğini azaltma özellikleri ile birlikte

antispazmodik etkileri uyarmasından dolayı anti-diyare etkiye sahip oldukları rapor edilmiştir (Agbor vd., 2014). Polifenollerin serbest radikalleri yakalama ve antioksidan aktiviteleri sayesinde midede artan mukus salgısı, antisekretuar etki ve *Helicobacter pylori* büyümesini durdurucu etkisi dolayısıyla da mide mukozasını çeşitli ülserojenik ajanlara karşı koruyabildiği bildirilmiştir (Sumbul vd., 2011). Bunun yanında biyoaktif bileşenlerin anti-depresyon etkisinin ise; serumda kortikosteron düzeyinin azalması ve serebral korteksteki nörotransmitterlerin (dopamin, adrenalin ve noradrenalin) reseptör sayılarının artmasına bağlı olduğu saptanmıştır (Sasaki vd., 2019). Avokado yaprağı, meyve eti ve çekirdeğinin biyolojik özellikleri ve tedavi edici uygulamaları Tablo 8'de detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 8. Avokado (*P. americana* Mill.) yaprağı, meyve eti ve çekirdeğinin biyolojik özellikleri ve diğer hastalıkları tedavi edici uygulamaları. (Biological properties of avocado leaf, fruit flesh and seed and therapeutic applications of other diseases.)

Kullanılan Materyal	Çözgen	İçerik	Etki	Referans
Yaprak	Kloroform Metanol	-	Albino Wistar sıçanları üzerinde <i>in vivo</i> anti-diyare etki	(Odo vd., 2014)
Yaprak	Su	-	Anti-diyare etki	(Abe ve Ohtani, 2013)
Yaprak	Su Metanol	-	Erkek albino sıçanlarda <i>in vivo</i> anti-ülser etki	(Oluwale vd., 2011)
Yaprak	Su	-	Böbrek taşı düşürücü etki	(Sıcak vd., 2013)
Meyve eti	Metanol n-Hekzan	-	<i>In vivo</i> (<i>C. elegans</i>) termotolerans üzerine etki	(Savaş vd., 2019)
Meyve eti	-	Tiramin	Anti-depresan etki	(Holst ve Williamson, 2008)
Meyve eti	-	Ksantofil	DNA hasarına karşı koruyucu etki	(Johnson vd., 2010)
Çekirdek	Kloroform- Metanol	-	Albino sıçanları üzerinde <i>in vivo</i> anti-diyare etki	(Odo vd., 2013)

Yaşlanma sürecine bağlı olarak göz ve deri sağlığı bozulmakta ve hücrelerde DNA hasarları meydana gelmektedir. Karotenoidler, ultraviyole (UV) ışınları ve radyasyona karşı deriyi koruyabilmektedir. Derideki karotenoid düzeyi besinlerle alınan miktarla pozitif korelasyon göstermektedir. Lutein ve zeaksantin alımı yaşla birlikte azalır ve kadınlarda daha düşüktür (Johnson vd., 2010). Avokadoda yüksek miktarda bulunan lutein ve zeaksantin gibi ksantofiller, doğal bir antioksidan görevi görerek; hücrelerin bozulmasını yavaşlatır (Roberts vd., 2009). Ayrıca lutein ve zeaksantin kısmen seçici olarak ışığın retinaya odaklandığı gözün makulasına alınır (Carpentier vd., 2009). Avokadoda bulunan lutein, özellikle katarakt ve sarı nokta hastalığı gibi göz hastalıklarından korunmayı sağlamaktadır (Krinsky ve Johnson, 2005; Dreher ve Davenport, 2013). Avokado, yarım meyve başına 185 µg lutein / zeaksantin kombinasyonu içerdiğinden ve diğer meyve ve sebzelerden karotenoid emilimini artırmaya yardımcı olduğu için göz sağlığına katkıda bulunduğu düşünülmektedir (Dreher ve Davenport, 2013).

Parkinson hastalığı, oksidatif stres ile ilişkili insan beynindeki sinir hücrelerinin işlevini kaybetmesidir. Colinred avokado kabuğundan ekstrakte edilen fenolik bileşikler (B-tipi prosiyanidin ve epikateşin), *in vivo* oksidatif stres modeli üzerinde çalışılmış ve parkinson hastalığını, oksidatif strese karşı koruyucu olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Ortega-Arellano vd., 2019).

3. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Ticari değeri yüksek egzotik bitkilerden biri olan avokado, gün geçtikçe popülaritesini arttırmaktadır. Ancak avokado bitkisinde ağacın ticari değeri olan tek kısmı meyve eti iken, meyvenin geri kalanının (kabuğu, çekirdeği, yaprağı) ise atık olarak yönetildiği görülmektedir. Bu derleme ile avokado meyve eti, kabuğu ve çekirdeği ile avokado ağacı yaprağının biyoaktif bileşen içerikleri incelenerek sahip oldukları zengin biyoaktif bileşen içeriği sayesinde insan sağlığı üzerine olumlu etkilerinin incelendiği *in vitro* ve *in vivo* çalışmaları göstermektedir. Yapılan literatür taramasında avokado yaprağındaki polifenol çeşitliliğinin ve miktarının avokado meyvesinin eti, kabuğu ve çekirdeğinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla yapılan çalışmalarda, avokado yaprağının antioksidan aktivitesinin de meyve eti, kabuğu ve çekirdeğinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak yapılan çalışmalar, avokado yaprağının yapısında tokoferol ve streol bileşenlerinin bulunmadığını, fakat meyve çekirdeğinin ve etinin farklı sterollerini içerdiğini ayrıca sadece meyve etinde tokoferollerin bulunduğunu göstermişlerdir. Bunun yanında, avokado çeşitlerindeki fenolik madde miktarları ve antioksidan kapasitelerinin farklılık gösterdiğini gözlemlenmiştir. Mesela Fuerte avokado çeşidinin yaprağının antioksidan aktivitesinin Hass avokado çeşidinin yaprağı ve meyve kabuğundan daha yüksek olduğu bildirilmiştir.

Sonuç olarak avokado meyvesi ve atıklarının, zengin biyoaktif bileşen içeriği sayesinde insan sağlığı üzerine olumlu etkileriyapılan *in vitro* ve *in vivo* analizlerle tespit edilmiştir. Avokadonun sağlık üzerine en önemli olumlu

etkisinin kardiyovasküler hastalıklar, lipid profilinin düzenlenmesi, tansiyon ve diyabet gibi kronik hastalıkları önlemesinin/durdurmasının yanında antioksidan, antikanser, antitümör, antiprotozoal, antimikobakteriyel, larvisidal, antifungal, antimikrobiyal ve antiinflamatuvar aktivite etkisi olarak görülmektedir.

Bu derleme kapsamında avokadonun zengin biyoaktif içeriği ve biyolojik etkileri sunulmaktadır. Bu hastalıkların önlenmesi ve kontrolünde kullanılabilmesi için daha fazla toksisite analizlerine ve klinik çalışmalara ihtiyaç duyulduğu göstermektedir. Elde edilecek olan sonuçlara göre ise, avokadonun atıklarının değerlendirilerek çevre dostu, biyolojik değeri yüksek ve hammaddesi ucuz olan yeni fonksiyonel gıda ürünlerinin üretiminde kullanılabileceği gibi, farmasötik alanında bitkisel gıda takviyesi üretiminde de kullanılabileceği 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)

- Abe, R., Ohtani, K., 2013. An Ethnobotanical Study of Medicinal Plants and Traditional Therapies on Batan Island, the Philippines. *Journal of Ethnopharmacology* 145 (2): 554–65.
- Adeboye, J. O., Fajonyomi, M.O., Makinde, J. M. ve Taiwo, O. B., 1999. A Preliminary study on the hypotensive activity of *Persea americana* leaf extracts in anaesthetized normotensive rats. *Fitoterapia* 70 (1): 15–20.
- Adeyemi, O. O., Okpo, S. O. ve Ogunti, O. O., 2002. Analgesic and anti-inflammatory effects of the aqueous extract of leaves of *Persea americana* Mill (Lauraceae). *Fitoterapia* 73 (5): 375–80.
- Agbor, G. A., Longo, F., Makong, E. A. ve Tarkang, P. A., 2014. Evaluation of the antidiarrheal and antioxidant properties of *Justicia hypocrateriformis*. *Pharmaceutical Biology*, 52(9), 1128–1133.
- Alarcon-Aguilar, F. J., Roman-Ramos, R., Perez-Gutierrez, S., Aguilar-Contreras, A., Contreras-Weber, C. C. ve Flores-Saenz, J. L., 1998. Study of the anti-hyperglycemic effect of plants used as antidiabetics. *Journal of Ethnopharmacology* 61 (2): 101–10.
- Alhassan, A. J., Sule, M. S., Atiku, M. K., Wudil, A. M., Abubakar, H. ve Mohammed, S. A., 2012. Effects of aqueous avocado pear (*Persea americana*) seed extract on alloxan induced diabetes rats. *Greener Journal of Medical Sciences* 2 (1): 005–011.
- Alkhalaf, M. I., Alansari, W. S., Ibrahim, E. A. ve Elhalwagy, M.E.A., 2019. Anti-oxidant, anti-inflammatory and anti-cancer activities of avocado (*Persea americana*) fruit and seed extract. *Journal of King Saud University - Science* 31 (4): 1358–62.
- Almeida, A. P. D., Miranda, M.M.F.S., Simoni, I. C., Wigg, M. D., Lagrota, M. H.C. ve Costa, S. S., 1998. Flavonol Monoglycosides Isolated from the Antiviral Fractions of *Persea americana* (Lauraceae) Leaf Infusion. *Phytotherapy Research* 12 (8): 562–67.
- Alonso-Castro, A.J., Maldonado-Miranda, J. J., Zarate-Martinez, A., Jacobo-Salcedo, M. D. R., Fernández-Galicia, C., Figueroa-Zuñiga, L. A., Rios-Reyes, N. A., Leo'n-Rubio, M. A., Medellin-Castillo, N. A., ... ve Reyes-Munguia, A., 2012. Medicinal Plants Used in the Huasteca Potosina, México. *Journal of Ethnopharmacology* 143 (1): 292–98.
- Anbar, D., 2014. Lipaz Enzimine Çeşitli Bitki Ekstrelerinin Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi), Marmara Üniversitesi.
- Ant, A., Avci, A., Genç, M., İnal, E., Tunçel, Ü. ve Şencan, Z., 2017. Avokado yaprağı ekstresinin larinks kanseri dokularında Adenozin Deaminaz (ADA) üzerine aktive edici etkisi." *Acta Oncologica Turcica* 51 (2): 199–204.
- Antasionasti, I., Riyanto, S. ve Rohman, A., 2017. Antioxidant Activities and Phenolics Contents of Avocado (*Persea americana* Mill.) Peel in vitro. *Research Journal of Medicinal Plants* 11 (2): 55–61.
- Araújo, R. G., Rodriguez-Jasso, R. M., Ruiz, H. A., Govea-Salas, M., Pintado, M. E. ve Aguilar, C. N., 2020. Process optimization of microwave-assisted extraction of bioactive molecules from avocado seeds. *Industrial Crops and Products* 154 (May): 112623.
- Araújo, R. G., Rodriguez-Jasso, R. M., Ruiz, H. A., Pintado, M. M. E., and Aguilar, C. N., 2018. Avocado by-products: Nutritional and functional properties. *Trends in Food Science and Technology* 80: 51-60. Elsevier Ltd.
- Arukwe, U., Amadi, B.A., Duru, M.K.C., Agomou, E.N., Adindu, E. A., Odika, P.C., Lele, K.C., Egejuru, L. ve Anudike, J., 2012. Chemical Composition of *Persea americana* Leaf, Fruit and Seed. *Ijrras* 11 (2): 346–49.
- Barbosa-Martín, E., Chel-Guerrero, L., González-Mondragón, E. ve Betancur-Ancona, D., 2016. Chemical and technological properties of avocado (*Persea americana* Mill.) seed fibrous residues. *Food and Bioprocess Technology* 100: 457–63.
- Barut Uyar, B. ve Sürücüoğlu, M. S., 2010. Besinlerdeki Biyolojik Aktif Bileşenler. *J Nutr and Diet* 38 (1–2): 69–76.
- Basli, A., Belkacem, N. ve Amrani, I., 2017. Health Benefits of Phenolic Compounds Against Cancers. *Phenolic Compounds - Biological Activity*.
- Bayram, S., 2010. Avokado (*Persea Americana* Mill.). BATEM. 2010 Yılı Avokado Gelişim Raporu.
- Bayram, S., Tepe, S. ve Toker, R., 2016. Hasat periyodu boyunca Hass avokado çeşidinin meyvelerinde bazı fiziksel ve kimyasal değişimlerin belirlenmesi. *Derim* 33 (1): 14–26.
- Bouic, P. J. D., 2002. Sterols and Sterolins: new drugs for the immune system?. *Drug Discovery Today* 7 (14): 775–778.
- Boulton, A. J.M., Malik, R. A., Arezzo, J. C. ve Sosenko, J. M., 2004. Diabetic Somatic Neuropathies. *Diabetes Care* 27 (6): 1458–86.
- Brai, B. I.C., Adisa, R. A. ve Odetola, A. A., 2014. Hepatoprotective Properties of Aqueous Leaf Extract of *Persea americana* Mill. (Lauraceae) 'Avocado' Against CCL4-Induced Damage In Rats. *African Journal of Traditional, Complementary, and Alternative Medicines : AJTCAM / African Networks on Ethnomedicines* 11 (2): 237–44.
- Brai, B. I.C., Odetola A.A. ve Agomo, P.U., 2007. Hypoglycemic and Hypocholesterolemic Potential of *Persea americana* Leaf Extracts. *Journal of Medicinal Food* 10 (2): 356–60.
- Brovelli, E. A., Vallejos, J. A., Ikonte, C., Menon, G. R., Fast, D. J. ve Chandra, A., 2005. Compositions Containing Avocado Leaf Extract For Lowering Cholesterol Levels. 1 (19).

- Brufau, G., Canela, M. A. ve Rafecas, M., 2008. Phytosterols: Physiologic and Metabolic Aspects Related to Cholesterol-Lowering Properties. *Nutrition Research* 28 (4): 217–25.
- Butt, A. J., Roberts, C. G., Seawright, A. A., Oelrichs, P. B., MacLeod, J. K., Liaw, T.Y.E., Kavallaris, M., Somers-Edgar, T.J., Lehrbach, G.M., Watts, C.K. VE Sutherland, R.L., 2006. A Novel Plant Toxin, Persin, with in vivo Activity in the Mammary Gland, Induces Bim-Dependent Apoptosis in Human Breast Cancer Cells. *Molecular Cancer Therapeutics* 5 (9): 2300–2309.
- Carpentier, S., Knaus, M. ve Suh, M., 2009. Associations between Lutein, Zeaxanthin, and Age-Related Macular Degeneration: An Overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 49 (4): 313–26.
- Castro-López, C., Bautista-Hernández, I., González-Hernández, M. D., Martínez-Ávila, G. C.G., Rojas, R., Gutiérrez-Díez, A., Medina-Herrera, N. ve Aguirre-Arzola, V. E., 2019. Polyphenolic Profile and Antioxidant Activity of Leaf Purified Hydroalcoholic Extracts from Seven Mexican *Persea Americana* Cultivars. *Molecules* 24 (1).
- Cerda-Opazo, P., Gotteland, M., Oyarzun-Ampuero, F. A. ve Garcia, L., 2021. Design, development and evaluation of nanoemulsion containing avocado peel extract with anticancer potential: A novel biological active ingredient to enrich food. *Food Hydrocolloids* 111 (September 2020): 106370.
- Chávez, F., Aranda, M., García, A. ve Pastene, E., 2011. Antioxidant polyphenols extracted from Avocado epicarp (*Persea americana* var. Hass) inhibit *Helicobacter Pylori* urease. *Boletín Latinoamericano y Del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas* 10 (3): 265–80.
- Cires, M. J., Navarrete, P., Pastene, E., Carrasco-Pozo, C., Valenzuela, R., Medina, D. A., Andriamihaja, M., Beaumont, M., Blachier, F. ve Gotteland, M., 2019. Protective Effect of an Avocado Peel Polyphenolic Extract Rich in Proanthocyanidins on the Alterations of Colonic Homeostasis Induced by a High-Protein Diet. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 67 (42): 11616–26.
- Colombo, R. ve Papetti, A., 2019. Avocado (*Persea americana* Mill.) by-products and their impact: from bioactive compounds to biomass energy and sorbent material for removing contaminants. A review. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(4), 943–951.
- D'Ambrosio, S. M., Han, C., Pan, L., Kinghorn, A. D. ve Ding, H., 2011. Aliphatic acetogenin constituents of avocado fruits inhibit human oral cancer cell proliferation by targeting the EGFR/RAS/RAF/MEK/ERK1/2 pathway. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 409 (3): 465–69.
- Dabas, D., Shegog, R.M., Ziegler, G.R. ve Lambert, J.D., 2013. Avocado (*Persea americana*) Seed as a Source of Bioactive Phytochemicals. *Current Pharmaceutical Design* 19 (34): 6133–40.
- Dabas, D., Ziegler, G.R. and Lambert, J.D., 2019. Anti-Inflammatory Properties of a Colored Avocado Seed Extract. *Advances in Food Technology and Nutritional Sciences - Open Journal* 5 (1): 8–12.
- Demirkol, A., 1995. Avocado Growing in Turkey. *Proceedings of The World Avocado Congress III*, 451–56.
- Dike, I.P., Obembe, O.O. ve Adebisi, F.E., 2012. Ethnobotanical survey for potential anti-malarial plants in south-western Nigeria. *Journal of Ethnopharmacology* 144 (3): 618–26.
- Ding, H., Chin, Y.W., Kinghorn, A.D. ve D'Ambrosio, S.M., 2007. Chemopreventive characteristics of avocado fruit. *Seminars in Cancer Biology* 17 (5): 386–94.
- Ding, H., Han, C., Guo, D., Chin, Y.W., Ding, Y., Kinghorn, A. D. ve D'Ambrosio, S.M., 2009. Selective Induction of Apoptosis of Human Oral Cancer Cell Lines by Avocado Extracts via a ROS-Mediated Mechanism. *Nutrition and Cancer* 61 (3): 348–56.
- Domergue, F., Helms, G. L., Prusky, D. ve Browse, J., 2000. Antifungal compounds from idioblast cells isolated from avocado fruits. *Phytochemistry* 54: 183–89.
- Domínguez, M. P., Araus, K., Bonert, P., Sánchez, F., San Miguel, G. ve Toledo, M., 2014. The Avocado and Its Waste: An Approach of Fuel Potential/Application. *Environment, Energy and Climate Change II*, 199–223.
- Dreher, M. L. ve Adrienne J. D., 2013. Hass Avocado Composition and Potential Health Effects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 53 (7): 738–50.
- Duarte, P. F., Chaves, M. A., Borges, C.D. ve Mendonça, C. R. B., 2016. Avocado: characteristics, health benefits, and uses. *International News on Fats, Oils and Related Materials* 28 (3): 28–32.
- Edem, D., Ekanem, I. ve Ebong, P., 2009. Effect of aqueous extracts of alligator pear seed (*Persea americana* Mill.) on blood glucose and histopathology of pancreas in alloxan-induced diabetic rats. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences* 22 (3): 272–76.
- Ejiofor, N. C., Ezeagu, I. E., Ayoola, M. ve Umera, E. A., 2018. Determination of the chemical composition of avocado (*Persea americana*) seed. *Advances in Food Technology and Nutritional Sciences - Open Journal* SE (2): S51–55.
- Eroğlu Özkan, E. ve Tavlı, Ö. F., 2020. Ülkemiz Kültür Bitkilerinden *Persea americana* Mill. (Avokado) ve Tıbbi Açidan Değerlendirilmesi. *Mersin Üniversitesi Tıp Fakültesi Lokman Hekim Tıp Tarihi ve Folklorik Tıp Dergisi* 10 (1): 28–36.
- Ezejirofor, A. N., Okorie, A. ve Orisakwe, O. E., 2013. Hypoglycaemic and Tissue-Protective Effects of the Aqueous Extract of *Persea americana* Seeds on Alloxan-Induced Albino Rats. *Malaysian Journal of Medical Sciences* 20 (5): 31–39.
- Falodun, A., Imieje, V., Erharuyi, O., Ahomafor, J., Melissa R. Jacob, M. R., Khan, S. I. ve Hamann, M. T., 2014. Evaluation of Three Medicinal Plant Extracts Against *Plasmodium Falciparum* and Selected Microorganisms. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines* 11 (4): 142–46.
- FAO, 2018. <http://www.fao.org/3/ca2320en/CA2320EN.pdf>
- Figuerola, J. G., Borrás-Linares, I., Lozano-Sánchez, J. ve Segura-Carretero, A., 2018. Comprehensive identification of bioactive compounds of avocado peel by liquid chromatography coupled to ultra-high-definition accurate-mass Q-TOF. *Food Chemistry* 245 (November 2017): 707–16.
- Fitzmaurice, C., Dicker, D., Pain, A., Hamavid, H., Moradi-Lakeh, M., MacIntyre, M. F., Allen, C., Hansen, G., Woodbrook, R., ... ve Wolfe, C., 2015. The Global Burden of Cancer 2013. *JAMA Oncology* 1 (4): 505–27.
- Fulgoni, V. L., Dreher, M. ve Davenport, A. J., 2013. Avocado Consumption Is Associated with Better Diet Quality and Nutrient Intake, and Lower Metabolic Syndrome Risk in US Adults: Results from the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 2001–2008. *Nutrition Journal* 12 (1): 1–6.

- García-Aguirre, K. K., Zepeda-Vallejo, L. G., Ramón-Gallegos, E., Álvarez-González, I. ve Madrigal-Bujaidar, E., 2008. Genotoxic and Cytotoxic Effects Produced by Acetogenins Obtained from *Annona cherimolia* Mill. *Biological and Pharmaceutical Bulletin* 31 (12): 2346–49.
- Gómez, F. S., Sánchez, S.P., Iradi, M.G.G., Azman, N.A.M. ve Almajano, M. P., 2014. Avocado seeds: extraction optimization and possible use as antioxidant in food. *Antioxidants* 3 (2): 439–54.
- Gross, J., Gabai, M., Lifshitz, A. ve Sklarz, B., 1973. Carotenoids in Pulp, Peel and Leaves of *Persea americana*. *Phytochemistry* 12 (9): 2259–63.
- Gutierrez, M.L. ve Villanueva, M., 2007. The avocado in the prehispanic time avocado in the prehispanic time. *Proceeding VI World Avocado Congress*, no. 978: 12–16.
- Guzmán-Rodríguez, J. J., López-Gómez, R., Suárez-Rodríguez, L. M., Salgado-Garciglia, R., Rodríguez-Zapata, L. C., Ochoa-Zarzosa, A. ve López-Meza, J. E., 2013. Antibacterial Activity of Defensin PaDef from Avocado Fruit (*Persea americana* var. *drymifolia*) Expressed in Endothelial Cells against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *BioMed Research International* 2013.
- Holst, B. ve Williamson, G., 2008. Nutrients and phytochemicals: from bioavailability to bioefficacy beyond antioxidants. *Current Opinion in Biotechnology* 19 (2): 73–82.
- Hozawa, A., Jacobs, D. R., Steffes, M. W., Gross, M. D., Steffen, L. M. ve Lee, D. H., 2007. Relationships of circulating carotenoid concentrations with several markers of inflammation, oxidative stress, and endothelial dysfunction: The Coronary Artery Risk Development in Young Adults (CARDIA)/Young Adult longitudinal Trends in Antioxidants (YALT) study. *Clinical Chemistry* 53 (3): 447–55.
- Ikpeme, E. V., Ekaluo, U.B., Udensi, O.U., Ekerette, E.E., 2014. Screening fresh and dried fruits of avocado pear (*Persea americana*) for antioxidant activities: An alternative for synthetic antioxidant. *Journal of Life Sciences Research and Discovery* 1 (April): 19–25.
- Imafidon, K. E. ve Amaechina, F.C., 2010. Effects of Aqueous Seed Extract of *Persea americana* Mill. (Avocado) on Blood Pressure and Lipid Profile in Hypertensive Rats. *Advances in Biological Research* 4 (2): 116–21.
- Irawati, N. A. V., 2015. Antihypertensive Effects of Avocado Leaf Extract (*Persea americana* Mill.). *Majority* 4: 44–48.
- Isaac, A. T., Ganiyu, O., Akinyemi, A. J., Ajani, R. A. ve Olanrewaju, B. O., 2014. Avocado pear fruits and leaves aqueous extracts inhibit α -amylase, α -glucosidase and snp induced lipid peroxidation—an insight into mechanisms involve in management of type 2 diabetes. *International Journal of Applied and Natural Sciences (IJANS)* 3 (5): 21–34.
- Jiménez-Arellanes, A., Luna-Herrera, J., Ruiz-Nicolás, R., Cornejo-Garrido, J., Tapia, A. ve Yépez-Mulia, L., 2013. Antiprotozoal and Antimycobacterial Activities of *Persea americana* Seeds. *BMC Complementary and Alternative Medicine* 13.
- Jiménez, P., García, P., Bustamante, A., Barriga, A. ve Robert, P., 2017. Thermal stability of oils added with avocado (*Persea americana* cv. Hass) or olive (*Olea europaea* cv. Arbequina) leaf extracts during the french potatoes frying. *Food Chemistry* 221: 123–29.
- Jimenez, P., Garcia, P., Quitral, V., Vasquez, K., Parra-Ruiz, C., Reyes-Farias, M., Garcia-Diaz, D. F., Robert, P., Encina, C. ve Soto-Covasich, J., 2020. Pulp, Leaf, Peel and Seed of Avocado Fruit: A Review of Bioactive Compounds and Healthy Benefits. *Food Reviews International* 00 (00): 1–37.
- Johnson, E. J., Maras, J. E., Rasmussen, H. M. ve Tucker, K. L., 2010. Intake of Lutein and Zeaxanthin Differ with Age, Sex, and Ethnicity. *Journal of the American Dietetic Association* 110 (9): 1357–62.
- Kawagishi, H., Fukumoto, Y., Hatakeyama, M., He, P., Arimoto, H., Matsuzawa, T., Arimoto, Y., Suganuma, H., Inakuma, T. ... ve Sugiyama, K., 2001. Liver Injury Suppressing Compounds from Avocado (*Persea americana*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49 (5): 2215–21.
- Kendir, G. ve Köroğlu, A., 2018. Evaluation of avocado (*Persea americana* Mill.) leaves in terms of public health. *Marmara Pharmaceutical Journal* 22 (3): 347–356.
- Khalifa, N. S., Barakat, H. S., Elhallowty, S. ve Salem, D., 2013. Effect of the Water Extracts of Avocado Fruit and Cherimoya Leaf on Four Human Cancer Cell Lines and Vicia Faba Root Tip Cells. *Journal of Agricultural Science* 5 (7): 245–54.
- Koller, O.C., 1992. *Abacaticultura*. Porto Alegre: UFRGS. 138p.
- Kopec, R. E., Cooperstone, J. L., Schweiggert, R. M., Young, G. S., Harrison, E. H., Francis, D. M., Clinton, S. K. ve Schwartz, S. J., 2014. Avocado Consumption Enhances Human Postprandial Provitamin A Absorption and Conversion from a Novel High- β -Carotene Tomato Sauce and from Carrots. *Journal of Nutrition* 144 (8): 1158–66.
- Krinsky, N. I. ve Johnson, E. J., 2005. Carotenoid actions and their relation to health and disease. *Molecular Aspects of Medicine* 26 (6): 459–516.
- Kulkarni, P., Paul, R. ve Ganesh, N., 2010. In Vitro Evaluation of Genotoxicity of Avocado (*Persea americana*) Fruit and Leaf Extracts in Human Peripheral Lymphocytes. *Journal of Environmental Science and Health - Part C Environmental Carcinogenesis and Ecotoxicology Reviews* 28 (3): 172–87.
- Kumar, A., Kumarchandra, R., Rai, R. ve Sanjeev, G., 2017. Anticlastogenic, radiation antagonistic, and anti-inflammatory activities of *Persea americana* in Albino Wistar rat model. *Research in Pharmaceutical Sciences* 12 (6): 488–99.
- Kumar, B. ve Cumbal, L., 2016. UV-Vis, FTIR and antioxidant study of *Persea americana* (Avocado) leaf and fruit : A comparison. *Revista de La Facultad de Ciencias Químicas*, 14, 13–20.
- Larijani, L. V., Ghasemi, M., AbedianKenari, S. ve Naghshvar, F., 2014. Evaluating the Effect of Four Extracts of Avocado Fruit on Esophageal Squamous Carcinoma and Colon Adenocarcinoma Cell Lines in Comparison with Peripheral Blood Mononuclear Cells. *Acta Medica Iranica* 52 (3): 201–5.
- Lee, S. H., Heo, J. S., Lee, M. Y. ve Han, H. J., 2008. Effect of Dihydrotestosterone on Hydrogen Peroxide-Induced Apoptosis of Mouse Embryonic Stem Cells. *Journal of Cellular Physiology* 216 (1): 269–75.
- Leite, J. J. G., Brito, É. H. S., Cordeiro, R. A., Brilhante, R. S. N., Sidrim, J. J. C., Bertini, L. M., Morais, S. M. D. ve Rocha, M. F. G., 2009. Chemical composition, toxicity and larvicidal and antifungal activities of *Persea americana* (avocado) seed extracts. *Revista Da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical* 42 (2): 110–13.
- Lima, C. R., Vasconcelos, C. F.B., Costa-Silva, J. H., Maranhão, C. A., Costa, J., Batista, T. M., Carneiro, E. M., Soares, L. A.L., Ferreira, F. ve Wanderley, A. G., 2012. Anti-diabetic activity of extract from *Persea americana* Mill. leaf via the activation of protein kinase B (PKB/Akt) in streptozotocin-induced diabetic rats. *Journal of Ethnopharmacology* 141 (1): 517–25.

- Litz, R.E., Raharjo, S.H.T. ve Lim, M. G., 2007. Avocado. *Transgenic Crops* V, 167-187.
- Liwa, A. C., Barton, E. N., Cole, W. C. ve Nwokocha, C. R., 2017. Bioactive Plant Molecules, Sources and Mechanism of Action in the Treatment of Cardiovascular Disease. In *Pharmacognosy: Fundamentals, Applications and Strategy*. Elsevier Inc.
- López-Cobo, A., Gómez-Caravaca, A. M., Pasini, F., Caboni, M. F., Segura-Carretero, A. ve Fernández-Gutiérrez, A., 2016. HPLC-DAD-ESI-QTOF-MS and HPLC-FLD-MS as valuable tools for the determination of phenolic and other polar compounds in the edible part and by-products of avocado." *LWT - Food Science and Technology* 73: 505-13.
- Lottenberg, A.M.P., Nunes, V. S., Nakandakare, E. R., Neves, M., Bernik, M., Santos, J. E., Quintão, E.C. R. ve Paulo, S., 2002. Plant sterol ester Efficiency on the Plasma Lipid Reduction in Moderate Hipercholesterolemic Subjects. *Arq Bras Cardiol* 79 (2): 139-42.
- Lu, Q. Y., Arteaga, J. R., Zhang, Q., Huerta, S., Go, V. L. W. ve Heber, D., 2005. Inhibition of prostate cancer cell growth by an avocado extract: role of lipid-soluble bioactive substances. *Journal of Nutritional Biochemistry* 16 (1): 23-30.
- Lu, Q. Y., Zhang, Y., Wang, Y., Wang, D., Lee, R. P., Gao, K., Byrns, R. ve Heber, D., 2009. California Hass Avocado: Profiling of Carotenoids, Tocopherol, Fatty Acid, and Fat Content during Maturation and from Different Growing Areas. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57 (21): 10408-13.
- Lu, Y. C., Chang, H. S., Peng, C. F., Lin, C. H. ve Chen, I. S., 2012. Secondary metabolites from the unripe pulp of *Persea Americana* and their antimycobacterial activities. *Food Chemistry* 135 (4): 2904-9.
- Makopa, M., Mangiza, B., Banda, B., Mozirandi, W., Mombeshora, M. ve Mukanganyama, S., 2020. Antibacterial, Antifungal, and Antidiabetic Effects of Leaf Extracts from *Persea americana* Mill. (Lauraceae). *Biochemistry Research International* 2020.
- Melgar, B., Dias, M. I., Ciric, A., Sokovic, M., Garcia-Castello, E. M., Rodriguez-Lopez, A. D., Barros, L. ve Ferreira, I. C.R.F., 2018. Bioactive characterization of *Persea americana* Mill. by-Products: A rich source of inherent antioxidants. *Industrial Crops and Products* 111 (June 2017): 212-18.
- Molina-Garza, Z. J., Bazaldúa-Rodríguez, A. F., Quintanilla-Licea, R. ve Galaviz-Silva, L., 2014. Anti-Trypanosoma cruzi activity of 10 medicinal plants used in northeast Mexico. *Acta Tropica* 136 (1): 14-18.
- Monge-Rojas, R. ve Campos, H., 2011. Tocopherol and carotenoid content of foods commonly consumed in Costa Rica. *Journal of Food Composition and Analysis* 24 (2): 202-16.
- Monika, P. ve Geetha, A., 2015. The modulating effect of *Persea americana* fruit extract on the level of expression of fatty acid synthase complex, lipoprotein lipase, fibroblast growth factor-21 and leptin - A biochemical study in rats subjected to experimental hyperlipidemia and obesity. *Phytomedicine* 22 (10): 939-45.
- Murathan, Z. T. ve Kaya, A., 2020. Alanya Ekolojik Koşullarında Yetişen İki Farklı Avokado Çeşidinin Bazı Fitokimyasal İçerikleri İle Antioksidan Aktivitelerinin İncelenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi* 3 (6): 1435-40.
- Niogret, J., Epsky, N. D., Schnell, E. Q., Schnell, R. J., Heath, R. R., Meerow, A. W. ve Kendra, P. E., 2013. Analysis of Sesquiterpene Distributions in the Leaves, Branches, and Trunks of Avocado (*Persea americana* Mill.). *American Journal of Plant Sciences* 04 (04): 922-31.
- Oboh, G., Isaac, A. T., Akinyemi, A. J. ve Ajani, R. A., 2014. Inhibition of Key Enzymes Linked to Type 2 Diabetes and Sodium Nitroprusside Induced Lipid Peroxidation in Rats' Pancreas by Phenolic Extracts of Avocado Pear Leaves and Fruit. *International Journal of Biomedical Science* 10 (3): 210-18.
- Oboh, G., Odubanjo, V. O., Bello, F., Ademosun, A. O., Oyeleye, S. I., Nwanna, E. E. ve Ademiluyi, A. O., 2016. Aqueous extracts of avocado pear (*Persea americana* Mill.) leaves and seeds exhibit anti-cholinesterases and antioxidant activities in vitro. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology* 27 (2): 131-40.
- Odo, C. E., Nwodo, O. F. C., Joshua, P. E., Ugwu, O. P.C. ve Okonkwo, C. C., 2013. Acute toxicity investigation and anti-diarrhoeal effect of the chloroform-methanol extract of the seeds of *Persea americana* in albino rats. *Journal of Pharmacy Research* 6 (3): 331-35.
- Odo, C. E., Nwodo, O. F. C., Joshua, P. E., Ugwu, O. P.C. ve Okonkwo, C. C., 2013. Acute toxicity investigation and anti-diarrhoeal effect of the chloroform-methanol extract of the leaves of *Persea americana*. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research* 13 (2): 651-58.
- Ojewole, J., Kamadyaapa, D. R., Gondwe, M. M., Moodley, K. ve Musabayane, C. T., 2007. Cardiovascular effects of *Persea americana* Mill (Lauraceae) (avocado) aqueous leaf extract in experimental animals. *Cardiovascular Journal of South Africa* 18 (2): 69-76.
- Oluwole, F. S., Onasanwo, S. A. ve Olaleye, S. B., 2011. Effects of Aqueous and Methanolic Extracts of *Persea americana* Leaf (Avocado Pear) On Gastric Acid Secretion In Male Albino Rats. *European Journal of Scientific Research* 61 (4): 474-81.
- Ortega-Arellano, H. F., Jimenez-Del-Rio, M. ve Velez-Pardo, C., 2019. Neuroprotective Effects of Methanolic Extract of Avocado *Persea americana* (var. Colinred) Peel on Paraquat-Induced Locomotor Impairment, Lipid Peroxidation and Shortage of Life Span in Transgenic knockdown Parkin *Drosophila melanogaster*. *Neurochemical Research* 44 (8): 1986-98.
- Ortiz, M.A., Dorantes, A. L., Gallndez, M. J. ve Cárdenas, S. E., 2004. Effect of a Novel Oil Extraction Method on Avocado (*Persea americana* Mill) Pulp Microstructure. *Plant Foods for Human Nutrition* 59 (1): 11-14.
- Ovesná, Z., Vachálková, A. ve Horváthov, K., 2004. Taraxasterol and β -sitosterol: New naturally compounds with chemoprotective/ chemopreventive effects. *NEOPLASMA* 55 (6):407-413.
- Owolabi, M. A., Coker, H. A. B. ve Jaja, S. I., 2010. Bioactivity of the phytoconstituents of the leaves of *Persea americana*. *Journal of Medicinal Plants Research* 4 (12): 1130-35.
- Owolabi, M. A., Jaja, S. I. ve Coker, H. A. B., 2005. Vasorelaxant action of aqueous extract of the leaves of *Persea americana* on isolated thoracic rat aorta. *Fitoterapia* 76 (6): 567-73.
- Pacheco, M. M., Gomez, R. L., Garciglia, R. S., Calderon, M. R. ve Muñoz, R. E. M., 2011. Folates and *Persea americana* Mill. (Avocado). *Emirates Journal of Food and Agriculture* 23 (3): 204-13.
- Pahua-Ramos, M. E., Ortiz-Moreno, A., Chamorro-Cevallos, G., Hernández-Navarro, M. D., Garduño-Siciliano, L., Necochea-Mondragón, H. ve Hernández-Ortega, M., 2012. Hypolipidemic Effect of Avocado (*Persea americana* Mill.) Seed in a Hypercholesterolemic Mouse Model. *Plant Foods for Human Nutrition* 67 (1): 10-16.

- Plaza, L., Sánchez-Moreno, C., Pascual-Teresa, S. D., Ancos, B. D. ve Cano, M. P., 2009. Fatty Acids, Sterols, and Antioxidant Activity in Minimally Processed Avocados during Refrigerated Storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57 (8): 3204–9.
- Polat Kose, L., Bingol, Z., Kaya, R., Goren, A. C., Akincioglu, H., Durmaz, L., Koksai, E., Alwasel, S. H. ve Gülçin, İ., 2020. Anticholinergic and antioxidant activities of avocado (*Folium persea*) leaves–phytochemical content by LC-MS/MS analysis. *International Journal of Food Properties* 23 (1): 878–93.
- Poovarodom, S., Haruenkit, R., Vearasilp, S., Namiesnik, J., Cvikrová, M., Martincová, O., Ezra, A., Suhaj, M., Ruamsuke, P. ve Gorinstein, S., 2010. Comparative characterisation of durian, mango and avocado. *International Journal of Food Science and Technology* 45 (5): 921–29.
- Rajeshkumar, S. ve Riniha, G., 2018. Nanostructural characterization of antimicrobial and antioxidant copper nanoparticles synthesized using novel *Persea americana* seeds. *OpenNano* 3 (January): 18–27.
- Rao, U. S. M., 2017. Salutary Potential of Ethanolic Extract of Avocado Fruit on Anomalous Carbohydrate Metabolic Key Enzymes in Hepatic and Renal Tissues of Hyperglycaemic Albino Rats. *Chinese Journal of Integrative Medicine*, no. 20400: 1–7.
- Rao, U. S. M. ve Adinew, B., 2011. Remnant B-Cell-Stimulative and Anti-Oxidative Effects of *Persea americana* Fruit Extract Studied in Rats Introduced into Streptozotocin - Induced Hyperglycaemic State. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines* 8 (3): 210–17.
- Roberts, C. G., Gurisik, E., Biden, T. J., Sutherland, R. L. ve Butt, A. J., 2007. Synergistic cytotoxicity between tamoxifen and the plant toxin persin in human breast cancer cells is dependent on Bim expression and mediated by modulation of ceramide metabolism. *Molecular Cancer Therapeutics* 6 (10): 2777–85.
- Roberts, R. L., Green, J. ve Lewis, B., 2009. Lutein and zeaxanthin in eye and skin health. *Clinics in Dermatology* 27 (2): 195–201.
- Rodríguez-Carpena, J. G., Morcuende, D., Andrade, M. J., Kylli, P. ve Estevez, M., 2011. Avocado (*Persea americana* Mill.) Phenolics, In Vitro Antioxidant and Antimicrobial Activities, and Inhibition of Lipid and Protein Oxidation in Porcine Patties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59 (10): 5625–35.
- Rodríguez-García, C., Sánchez-Quesada, C. ve Gaforio, J. J., 2019. Dietary Flavonoids as Cancer Chemopreventive Agents: An Updated Review of Human Studies. *Antioxidants* 8 (5): 1–23.
- Rodríguez-Sánchez, D. G., Flores-García, M., Silva-Platas, C., Rizzo, S., Torre-Amione, G., Peña-Díaz, A. D. L., Hernández-Brenes, C. ve García-Rivas, G., 2014. Isolation and chemical identification of lipid derivatives from avocado (*Persea americana*) pulp with antiplatelet and antithrombotic activities. *Food and Function* 6 (1): 193–203.
- Rodríguez-Sánchez, D., Silva-Platas, C., Rojo, R. P., García, N., Cisneros-Zevallos, L., García-Rivas, G. ve Hernández-Brenes, C., 2013. Activity-guided identification of acetogenins as novel lipophilic antioxidants present in avocado pulp (*Persea americana*). *Journal of Chromatography B: Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences* 942–943: 37–45.
- Rosenblat, G., Meretski, S., Segal, J., Tarshis, M., Schroeder, A., Zanin-Zhorov, A., Lion, G., Ingber, A. ve Hochberg, M., 2011. Polyhydroxylated fatty alcohols derived from avocado suppress inflammatory response and provide non-sunscreen protection against UV-induced damage in skin cells. *Archives of Dermatological Research* 303 (4): 239–46.
- Rotta, E. M., Morais, D. R. D., Biondo, P. B. F., Santos, V. J. D., Matsushita, M. ve Visentainer, J. V., 2016. Use of avocado peel (*Persea americana*) in tea formulation: a functional product containing phenolic compounds with antioxidant activity. *Acta Scientiarum - Technology* 38 (1): 23–29.
- Salgado, J. M., Bin, C., Mansi, D. N. ve Souza, A., 2008. Effect of the hass avocado (*Persea americana* Mill) on hipercolesterolemic rats. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 28 (4): 922–28.
- Salonen, R. M., Nyyssönen, K., Kaikkonen, J., Porkkala-Sarataho, E., Voutilainen, S., Rissanen, T. H., Tuomainen, T. P., Valkonen, V. P., Ristonmaa, U., ... ve Lakka, H. M., 2003. Six-Year Effect of Combined Vitamin C and E Supplementation on Atherosclerotic Progression: The Antioxidant Supplementation in Atherosclerosis Prevention (ASAP) Study. *Circulation* 107 (7): 947–53.
- Sargin, A. S., 2015. Ethnobotanical survey of medicinal plants in Bozyazı district of Mersin, Turkey. *Journal of Ethnopharmacology* 173: 105–126.
- Sasaki, K., Iwata, N., Ferdousi, F., ve Isoda, H., 2019. Antidepressant-Like Effect of Ferulic Acid via Promotion of Energy Metabolism Activity. *Molecular Nutrition and Food Research*, 63(19), 1–9.
- Savaş, N., Ögüt, S., Olgun, A. ve Güvenç, A., 2019. Avokadonun (*Persea americana*) *Caenorhabditis elegans* Termotoleransı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. *Adnan Menderes Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Dergisi* 4 (1): 30–36.
- Segovia, F. J., Corral-Pérez, J. J. ve Almajano, M. P., 2016. Avocado Seed: Modeling extraction of bioactive compounds.” *Industrial Crops and Products* 85: 213–20.
- Serra-Majem, L., Roman, B. ve Estruch, R., 2006. Scientific Evidence of Interventions Using the Mediterranean Diet: A Systematic Review. *Nutrition Reviews* 64 (2): 27–47.
- SIAP, 2015. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. http://infosiap.siap.gob.mx/agricola_siap_gb/identidad/index.jsp, Accessed date: 21 August 2017.
- Sıcak, Y., Çolak, Ö. F., İlhan, V., Sevindik, E. ve Alkan, N., 2013. Köyçeğiz Yöresinde Halk Arasında Yaygın Olarak Kullanılan Bazı Tıbbi ve Aromatik Bitkiler. *Journal of Anatolian Natural Sciences* 4(2): 70–77.
- Soong, Y. Y. ve Barlow, P. J., 2004. Antioxidant activity and phenolic content of selected fruit seeds. *Food Chemistry* 88 (3): 411–17.
- Sumbul, S., Ahmad, M. A., Asif, M. ve Akhtar, M. 2011. Role of phenolic compounds in peptic ulcer: An overview. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 3(3), 361–367.
- Tan, C. X., 2019. Virgin avocado oil: An emerging source of functional fruit oil. *Journal of Functional Foods* 54 (October 2018): 381–92.
- Tremocoldi, M. A., Rosalen, P. L., Franchin, M., Massarioli, A. P., Denny, C., Daiuto, E. R., Paschoal, J. A. R., Melo, P. S. ve Alencar, S. M. D., 2018. Exploration of Avocado By-Products as Natural Sources of Bioactive Compounds. *PLOS ONE*.
- TUIK, 2019. <http://www.tuik.gov.tr> (17.12.2019).
- Uçak, S. ve Kızıltan, G., 2021. Akdeniz Diyeti ve Kanser. *Başkent Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Dergisi* 6 (2): 105–21.

- Utrera, M., Rodríguez-Carpena, J. G., Morcuende, D. ve Estévez, M., 2012. Formation of Lysine-Derived Oxidation Products and Loss of Tryptophan during Processing of Porcine Patties with Added Avocado Byproducts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60 (15): 3917–26.
- Vauzour, D., Rodríguez-Mateos, A., Corona, G., Oruna-Concha, M. J., ve Spencer, J. P. E., 2010. Polyphenols and human health: Prevention of disease and mechanisms of action. *Nutrients*, 2(11), 1106–1131.
- Vermerris, W. ve Nicholson, R., 2006. Families of phenolic compounds and means of classification: Phenolic compound biochemistry. Editörler: Vermerris, W., Nicholson, R., Springer, Netherlands, pp: 1-34.
- Villa-Rodríguez, J. A., Aydin, E., Gauer, J. S., Pyner, A., Williamson, G. ve Kerimi, A., 2017. Green and Chamomile Teas, but not Acarbose, Attenuate Glucose and Fructose Transport via Inhibition of GLUT2 and GLUT5. *Molecular Nutrition and Food Research*, 61(12), 1–47.
- Vinha, A. F., Sousa, C., Soares, M. O. ve Barreira, S. V. P., 2020. Avocado and Its By-Products : Natural Sources of Nutrients, Phytochemical Compounds and Functional Properties. *Agricultural and Food Science*, 1, 82-96.
- Voutilainen, S., Nurmi, T., Mursu, J. ve Rissanen, T. H., 2006. Carotenoids and cardiovascular health. *American Journal of Clinical Nutrition* 83 (6): 1265–71.
- Wang, W., Bostic, T. R. ve Gu, L., 2010. Antioxidant capacities, procyanidins and pigments in avocados of different strains and cultivars. *Food Chemistry* 122 (4): 1193–98.
- Weremfo, A., Adulley, F. ve Adarkwah-Yiadom, M., 2020. Simultaneous Optimization of Microwave-Assisted Extraction of Phenolic Compounds and Antioxidant Activity of Avocado (*Persea americana* Mill.) Seeds Using Response Surface Methodology. *Journal of Analytical Methods in Chemistry* 2020.
- Widiyastuti, Y., Pratiwi, R., Riyanto, S. ve Wahyuono, S., 2018. Cytotoxic activity and apoptosis induction of avocado *Persea americana* Mill. seed extract on MCF-7 cancer cell line. *Indonesian Journal of Biotechnology* 23 (2): 61–67.
- WHO, 2017. World Health Organization, Cardiovascular Diseases. Son Erişim: Available at: http://www.who.int/cardiovascular_diseases/en/ Accessed July 08, 2017.
- Yamassaki, F. T., Campestrini, L. H., Zawadzki-Baggio, S. F. ve Maurer, J. B. B., 2017. Avocado leaves: Influence of drying process, thermal incubation, and storage conditions on preservation of polyphenolic compounds and antioxidant activity. *International Journal of Food Properties* 20 (2): 2280–93.
- Yasir, M., Das, S. ve Kharya, M., 2010. The phytochemical and pharmacological profile of *Persea americana* Mill. *Pharmacognosy Reviews* 4 (7): 77–84.
- Yurt, M. ve Büyüktuncer Demirel, Z., 2017. Sağlıklı Beslenmede Avokadonun Yeri. *Bes Diy Derg* 45 (2): 161–70.
- Zafar, T. ve Sidhu, J. S., 2011. Avocado: Production, Quality, and Major Processed Products. *Handbook of Vegetables and Vegetable Processing* 1871: 525–43.
- Zakariya, U. A., Umar, U. A., Dambazau, S. M. ve Sulaiman, A., 2016. Comparative Hepatotoxic Effects of Aqueous and Phenolic Extracts of Avocado (*Persea americana*) Seed in Wistar Albino Rats. *International Journal of Biochemistry Research & Review* 10 (4): 1–6.