



Dicle Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

mühendislikdergisi
journal of engineering

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
mühendislikdergisi
Cilt: 13, Sayı: 2, Haziran 2022 ISSN: 1309-8640

Dicle Üniversitesi Adına yayın Sahibi / Privilige Owner
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Baş Editör / Editor-in-Chief
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

Alan Editörleri / Field Editors
Mehmet Sıraç Özerdem
İbrahim KAYA
İdris BEDİRHANOĞLU
Bilal Gümüş
Gurbet Örçen

Tasarım-Dizgi / Designing-Editing
Mesut ŞEKER

Yazışma Adresi

Mühendislik Dergisi, Koordinatörlük ve Yayın Bürosu,
Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 21280 Diyarbakır
Telefon : +90-412 241 10 00 (Dahili: 3637)
Elektronik posta : muhendislikdergisi@dicle.edu.tr
web : <http://dergipark.gov.tr/dumf>, <https://duje.dicle.edu.tr/journal/>

Dergide yayınlanan yazılar izinsiz başka bir yerde yayınlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz.

ISSN Basılı Materyal: 1309-8640
Online ISSN: 2146-4391

Hakem Listesi / *Reviewers List*

Dergimize yayınlanmak üzere gönderilmiş olan makaleleri titiz bir şekilde değerlendiren kıymetli hakem hocalarımıza, değerli katkılarından dolayı teşekkür eder, katkılarının devamını dileriz.

We greatly appreciate the contributions made by the scientists, who worked as reviewers for Dicle University Journal of Engineering (DUJE) and we expect their contributions to the following journal issues.

- Mehmet Emin Tağluk (İnönü Üniversitesi)
Ali Karcı (İnönü Üniversitesi)
Mehmet Emin Öncü (DU)
Baki Öztürk (Hacettepe Üniversitesi)
Abdullah Sessiz (DU)
Buhara Yücesan (Abant İzzet Baysal Üniversitesi)
Zekai Şen (Medipol Üniversitesi)
Oral Yağcı (ITU)
Hamit Adin (Batman Üniversitesi)
Nihat Tosun (Fırat Üniversitesi)
Tacettin Geçkil (İnönü Üniversitesi)
Barış Sayın (İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa)
Leyla Çakır (KTU)
Deniztan Ulutaş Karakol (KTU)
Şerife Gengeç Benli (Erciyes Üniversitesi)
Sema Atasever (Nevşehir Üniversitesi)
Murat Tören (Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi)
Mehmet Çunkaş (Selçuk Üniversitesi)
Ahmet Sertaç Karakaş (İstanbul Üniversitesi)
Murat Dener (Bingöl Üniversitesi)
Hasan Kürüm (Fırat Üniversitesi)
Erdal Şehirli (Kastamonu Üniversitesi)
Abdulahkim Karakaya (Kocaeli Üniversitesi)
Mehmet İlyas Bayındır (Fırat Üniversitesi)
Ömer Ali Karaman (Batman Üniversitesi)
Yaşar Daşdemir (Erzurum Üniversitesi)
Yusuf Yaslan (ITU)
Ali Hakan Işık (Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi)
Burak Yön (Munzur Üniversitesi)
Mesut Şeker (DU)
Selim Buyrukoğlu (Karatekin Üniversitesi)

Orhan Er (Bakırçay Üniversitesi)
Şaban Öztürk (Bilkent Üniversitesi)
Serhat Peker (Bakırçay Üniversitesi)
Mehmet Sıraç Özerdem (DU)
Mesut Gör (Fırat Üniversitesi)
Osman Günaydın (Adıyaman Üniversitesi)
Hakan Donuk (Şırnak Üniversitesi)
Sencer Ünal (Fırat Üniversitesi)
Murat Çelik (ITU)
Konuralp Girgin (ITU)
Vedat Toğan (ITU)
Onur Behzat Tokdemir (ODTU)
Seçil Karatay (Kastamonu Üniversitesi)
Heybet Kılıç (DU)
Bilal Alataş (Fırat Üniversitesi)
Ömer Faruk Ertuğrul (Batman Üniversitesi)

İçindekiler / *Table of Contents*

Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

On Encryption with Continued Fraction (Research Article) Merve Güney Duman	149
Bitki fabrikalarında kontrol edilen parametreler ve kontrol yöntemleri (Derleme Makalesi) <i>Controlled parameters and control methods in plant factories (Review Article)</i> Sinem Seyhan, T. Göktürk Seyhan, Hasan H. Silleli, Hasan Yılmaz	153
Kentsel Dönüşüm Sürecinde Binaların Mekânsal Veri Madenciliği Yöntemleri ile Tespiti (Araştırma Makalesi) <i>Detection of Buildings in the Urban Transformation Process with Spatial Data Mining Methods (Research Article)</i> Emre Turgut, Murat Taşyürek, Nuh Azginoğlu	161
Ateş Böceği Algoritması ile Yağlı Tip Transformatörün Ağırlık Optimizasyonu (Araştırma Makalesi) <i>The Weight Optimisation of Oil-Type Transformer with Firefly Algorithm (Research Article)</i> Mizgin Akdağ, Mehmet Çelebi	169
Eksenel akılı tam adım sargılı anahtarlama relüktans makinasının stator/rotor kutup şekillerinin motor performansına etkisi (Araştırma Makalesi) <i>The effect of stator/rotor pole shapes of the fully pitched axial flux switched reluctance machine on the motor performance (Research Article)</i> Cihan Şahin	181
Paralel Aktif Güç Filtresi Kullanarak Asenkron Motorun Reaktif Güç Kompanzasyonun PSCAD ile Modellenmesi (Araştırma Makalesi) <i>Modeling of Reactive Power Compensation of Induction Motor with PSCAD Using Parallel Active Power Filter (Research Article)</i> Mustafa Güngör, Mehmet Emin Asker, Muhammed Bahaddin Kurt	191
Comparison of hybrid and non-hybrid models in short-term predictions on time series in the R development environment (Research Article) Zeydin Pala, İbrahim Halil Ünlük	199
Applying graph convolution networks to recommender systems based on graph topology (Research Article) Alper Özcan	205
EEG sinyallerini kullanarak Alzheimer hastalığının otomatik tespiti için bilgisayar destekli tanı sistemi (Araştırma Makalesi) <i>Computer aided diagnostic system for automatic detection of Alzheimer's disease using EEG signals (Research Article)</i> Zülfikar Aslan	213

Bagging and Boosting Methods for Predicting Mortality of Patients with COVID-19 (Research Article) Hilal Arslan	221
Using Machine Learning Algorithms For Classifying Transmission Line Faults (Research Article) Tuba Tanyıldızı Ağır	227
Eğitimde ve Tıpta Sanal Gerçeklik Uygulamaları: Geçmişten Geleceğe Uzanan Bir İnceleme (Derleme Makalesi Makalesi) <i>Applications of Virtual Reality in Education and Medicine: A Review of the Past, Present, and Future Outlook (Review Article)</i> Ufuk Çelikcan	235
Design of a Three Phase Z-Source Inverter for Photovoltaic Systems (Research Article) Gökhan Parla, Mehmet Özdemir	253
Detection of Object (Weapons) With Deep Learning Algorithms from Images Obtained by Unmanned Aerial Vehicles (Research Article) Mustafa Burgaz, Cafer Budak	263
Öz Dikkat Mekanizması Tabanlı Görü Dönüştürücü Kullanılarak Sıtma Parazit Tespiti (Araştırma Makalesi) <i>Malaria Parasite Detection Using Self-Attention Mechanism Based Vision Transformer (Research Article)</i> İbrahim Tuncel, Abdulkadir Albayrak, Mehmet Akın	271
İşbirlikçi Yapay Zeka Konsepti: Federe Öğrenmeye Genel Bir Bakış (Derleme Makalesi) <i>Collaborative Artificial Intelligence Concept: Federated Learning Review (Review Article)</i> Mehmet Nergiz	279

Makina Mühendisliği / Mechanical Engineering

Montmorillonite nanokil ilave edilmiş düşük yoğunluklu polietilen/polistiren/stiren bütadien stiren polimer kompozitinin fiziksel ve aşınma özelliklerinin incelenmesi (Araştırma Makalesi) <i>Investigation of physical and wear properties of montmorillonite nanoclay added low density polyethylene/polystyrene/styrene butadiene styrene polymer composite (Research Article)</i> Gizem Karadirek, Çağla Ceren Aydın, Münir Taşdemir	287
--	------------

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 kapsamında betonarme çerçeve ve saplama/ikincil kirişlerin kesit tesirlerindeki değişimin karşılaştırılması (Araştırma Makalesi) <i>Detection of structural problems in historical buildings with non-destructive methods; Comparison of cross-sectional effects of reinforced concrete frame and anchored /secondary beams within the scope of DBYBHY-2007 and TBDY-2018 (Research Article)</i> Orhan Doğan, Yunus Genç, Melek Akgül	295
--	------------

Yeşil ve gri altyapı sistemlerinin bulanık analitik hiyerarşi prosesi yardımıyla karşılaştırmalı performans analizi (Araştırma Makalesi) <i>Comparative performance analysis of green and gray infrastructure systems by means of the fuzzy analytical hierarchy process (Research Article)</i> Uğur Ünal, Dilek Eren Akyüz	307
Farklı Kalınlıktaki Modifiye Asfalt Yol Kaplamalarının Gerilme-Deformasyon ve Ses Yutma Performans Özelliklerinin İncelenmesi (Araştırma Makalesi) <i>Investigation of Modified Asphalt Pavement with Different Thicknesses On Stress-Strain and Sound Absorption Performance Characteristics (Research Article)</i> Ahmet Sertaç Karakaş, Tarık Serhat Bozkurt	319
Düşey Yönlü Deformasyon Araştırması (Araştırma Makalesi) <i>Vertical Deformation Research (Research Article)</i> Nazan Yılmaz, Nilüfer Demirsoy	329
Geleneksel bitümlü sıcak karışım üstyapı tabakalarının dinamik rijitlik modülünün tahmini ve Marshall dizayn yöntemi verileriyle karşılaştırılması (Araştırma Makalesi) <i>Estimation of dynamic modulus of stiffness of conventional bituminous hot mix pavement layers and comparison with Marshall Design method data (Research Article)</i> İhsan Güzel, Ahmet Benli	339
A computer program for linear analysis of two-dimensional semi-rigid frames (Research Article) Senem Çetin Yılmaz, Halil Görgün, Derman Kaya	351
Katkı türü ve oranının yüksek plastisiteli kilin kompaksiyon parametrelerine etkisi (Araştırma Makalesi) <i>The effect of additive type and ratio on the compaction parameters of high plasticity clay (Research Article)</i> Yasemin Aslan Topçuoğlu, Zülfü Gürocak	359
Influence Surface Coefficients of Plates Resting on Pasternak Foundation (Research Article) Ülkü Hülya Çalık Karaköse	371
Proactive prevention model to manage construction time delays in developing countries (Research Article) Ibrahim Salwan Majeed CHENENA, Gökhan Kazar	379

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (DÜMF) Mühendislik Dergisi yayınlarında varılan sonuçlar veya fikirlerin sorumluluğunu taşımamaktadır. Üniversite'nin, bu yayında ileri sürülen bilgi, alet, ürün veya işlevin doğruluğu, bütünlüğü, uygunluğu ve kullanılabilirliği konusunda bir yüklenimi ve iddiası bulunmamaktadır. Bu nedenle herhangi bir şekilde sorumlu tutulamaz.

Bu yayının herhangi bir kısmı, mühendislik dergisinin yazılı izni olmadıkça kaynak gösterilmeden yayınlanamaz, bilgi saklama sistemine alınamaz veya elektronik, mekanik, fotokopi, kayıt veya başka sistemlerle çoğaltılamaz.



On Encryption with Continued Fraction

Merve GÜNEY DUMAN^{1*}

¹ Sakarya University of Applied Sciences, Department of Engineering Fundamental Sciences, merveduman@subu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-6340-4817

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 December 2021
Received in revised form 5 March 2022
Accepted 30 March 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

*continued fractions, cryptography,
information security, cryptography*

ABSTRACT

Many mathematicians have investigated the properties of continued fractions. They made continued fraction expansions of the Pi number, the golden ratio and many more special numbers. With the help of continued fractions, they obtained solutions of some Diophantine equations were. In this study, we make encryption using continued fractional expansions of the square root of non-perfect-square integers. We represent each of the 29 letters in the alphabet as the root of nonperfect square integers starting from 2. Then, we calculate the continued fraction expansions of the square root of each letter's number equivalent. Afterwards, we consider all numbers in the continued fraction expansion as an integer by removing the comma. We consider each word as individual letters, and left spaces between the encrypted versions of each letter. After the encryption process, we deal with the process of deciphering the encrypted text. In the deciphering process, since there is a blank between the numbers, we write the numbers as a continued fraction and calculate the integer expansion. Later, we find the letter corresponding to this number.

Doi: 10.24012/dumf.1038230

* Corresponding author

Introduction

It is known that the discovery of the continued fraction dates back to very old history. The first known information is the calculation of the Euclid algorithm of two relatively prime numbers in 306 BC [1]. In [1], Aryabhata used continued fractions in the solution of linear equations. In 1965, Walls whose book is *Opera Mathematica* explained how to find continued fractions expansion, and revealed some interesting features related to continued fractions. He demonstrated the term of continued fraction. In 1987, Christiaan Huygens made the first implementation of the theory and explained the best rational approximations. Lagrange found the values of the irrational roots of quadratic equations with the help of continued fractions. References [1-4] can be consulted to have more detailed information about the studies on continued fractions since 306 BC.

Cryptography, on the other hand, is the science that deals with encrypting the data, transferring it from one point to another, and converting the encrypted data to the previous one. Cryptology; includes cryptography and cryptanalysis. There are two types of encryption systems in cryptography. The first is symmetric (secret key) encryption and the other is asymmetric (public key) encryption. Although the key is known in encryption with public keys, it is not possible to crack the password without performing a complex

mathematical operation. In private key ciphers, the key is directly decrypted when it is received by untrusted sources. Consequently, it must be protected very well. Many encryption methods have been developed from past to present and these encryption methods have been used in many fields.

Number theory plays a crucial role in cryptography. One of the oldest encryption methods using congruences is Caesar encryption. The Caesar cipher uses replacing each letter of the alphabet with the letter standing three places further down the alphabet. In Affine cipher, the congruences features are used. The RSA cryptosystem was introduced by Rivest et al. (1978), it is based on the hardship of factoring huge numbers. Vast prime numbers were used in RSA encryption. In the discrete algorithm, especially Fermat's theorem was used. The other examples of cryptosystems developed using congruences features are Diffie-Hellman key exchange and El-Gamal encryption. Özyılmaz and Nalli restructured the generalized discrete algorithm problem and generalized El-Gamal cryptosystem based on this problem by using the power Fibonacci number module m [5].

Koblitz worked on cryptosystems using elliptic curve properties [6]. Lately, many authors were interested in Fibonacci coding theory. References [7-23] can be

consulted to have detailed information about the studies on number theory or coding theory.

Definitions, Theorems, and Methods

In this section, necessary definitions and theorems about continued fractions will be given. Continued fraction expansion (CFE) table of the first 29 non-square positive integers will be written.

Definition 1. Let a_0, a_1, a_2, \dots be integers. An expression in the form

$$[a_0, a_1, a_2, \dots] = a_0 + \frac{1}{a_1 + \frac{1}{a_2 + \frac{1}{a_3 + \frac{1}{\ddots}}}}$$

is called simple infinite continued fraction where a_i values are called partial divisors for $i = 0, 1, 2, \dots$

Theorem 1. Let a_0, a_1, a_2, \dots be integers. In this case, any number with infinite continued fraction expansion is irrational. On the contrary, every irrational number has a unique infinite continued fraction expansion [21].

Theorem 2. Let α be an irrational number. In this case, it is $\alpha = [a_0, a_1, a_2, \dots]$ if defined as

$$\alpha = \alpha_0, a_k = \llbracket \alpha_k \rrbracket$$

$$\alpha_{k+1} = \frac{1}{\alpha_k - a_k} \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

Also this simple infinite continued fraction expansion is unique [21].

Theorem 3. Let d be a positive integer that is not a perfect square. Then there is a continued fraction expansion of \sqrt{d} such that

$$\sqrt{d} = [a_0, \overline{a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, 2a_0}]$$

where n is the period length.

Example 1. Find the CFE of the $\sqrt{19}$ by using Theorem 2.

Solution 1. Let $\alpha = \alpha_0 = \llbracket \sqrt{19} \rrbracket$. By using Theorem 2, we get

$$\alpha_0 = \llbracket \sqrt{19} \rrbracket = 4, \alpha_1 = \frac{1}{\sqrt{19} - 4} = \frac{\sqrt{19} + 4}{3}$$

$$\alpha_1 = \llbracket \frac{\sqrt{19} + 4}{3} \rrbracket = 2, \alpha_2 = \frac{1}{\frac{\sqrt{19} + 4}{3} - 2} = \frac{3}{\sqrt{19} - 2} = \frac{\sqrt{19} + 2}{5}$$

$$\alpha_2 = \llbracket \frac{\sqrt{19} + 2}{5} \rrbracket = 1, \alpha_3 = \frac{1}{\frac{\sqrt{19} + 2}{5} - 1} = \frac{5}{\sqrt{19} - 3} = \frac{\sqrt{19} + 3}{2}$$

$$\alpha_3 = \llbracket \frac{\sqrt{19} + 3}{2} \rrbracket = 3, \alpha_4 = \frac{1}{\frac{\sqrt{19} + 3}{2} - 3} = \frac{2}{\sqrt{19} - 3} = \frac{\sqrt{19} + 3}{5}$$

$$\alpha_4 = \llbracket \frac{\sqrt{19} + 3}{5} \rrbracket = 1, \alpha_5 = \frac{1}{\frac{\sqrt{19} + 3}{5} - 1} = \frac{5}{\sqrt{19} - 2} = \frac{\sqrt{19} + 2}{3}$$

$$\alpha_5 = \llbracket \frac{\sqrt{19} + 2}{3} \rrbracket = 2, \alpha_6 = \frac{1}{\frac{\sqrt{19} + 2}{3} - 2} = \sqrt{19} + 4$$

$$\alpha_6 = \llbracket \sqrt{19} + 4 \rrbracket = 8 = 2\alpha_0.$$

Then, according to Theorem 3,

$$\sqrt{19} = [4, \overline{2, 1, 3, 1, 2, 8}]$$

is obtained. Using Theorem 2, CFE of positive numbers which are not a perfect square and between 2 and 34 has been found and these values are given in Table 1.

Table 1. Continued fraction expansion of some positive numbers.

d	\sqrt{d}	d	\sqrt{d}
2	$[1, \overline{2}]$	20	$[4, \overline{2, 8}]$
3	$[1, \overline{1, 2}]$	21	$[4, \overline{1, 1, 2, 1, 1, 8}]$
5	$[2, \overline{4}]$	22	$[4, \overline{1, 2, 4, 2, 1, 8}]$
6	$[2, \overline{2, 4}]$	23	$[4, \overline{1, 3, 1, 8}]$
7	$[2, \overline{1, 1, 1, 4}]$	24	$[4, \overline{1, 8}]$
8	$[2, \overline{1, 4}]$	26	$[5, \overline{10}]$
10	$[3, \overline{6}]$	27	$[5, \overline{5, 10}]$
11	$[3, \overline{3, 6}]$	28	$[5, \overline{3, 2, 3, 10}]$
12	$[3, \overline{2, 6}]$	29	$[5, \overline{2, 1, 1, 2, 10}]$
13	$[3, \overline{1, 1, 1, 1, 6}]$	30	$[5, \overline{2, 10}]$
14	$[3, \overline{1, 2, 1, 6}]$	31	$[5, \overline{1, 1, 3, 5, 3, 1, 1, 10}]$
15	$[3, \overline{1, 6}]$	32	$[5, \overline{1, 1, 1, 10}]$
17	$[4, \overline{8}]$	33	$[5, \overline{1, 2, 1, 10}]$
18	$[4, \overline{4, 8}]$	34	$[5, \overline{1, 4, 1, 10}]$
19	$[4, \overline{2, 1, 3, 1, 2, 8}]$		

In this part, information about how the coding technique is done by means of CFE will be given.

Existence: According to Theorem 1, each irrational number has an infinite CFE [21].

Uniqueness: According to Theorem 1, the CFE of each irrational number is unique [21].

In Table 2, the matching of each letter with non-square integers is given.

Table 2. Numbered letters

A	B	C	Ç	D	E
2	3	5	6	7	8
F	G	Ğ	H	I	İ
10	11	12	13	14	15
J	K	L	M	N	O
17	18	19	20	21	22
Ö	P	R	S	Ş	T
23	24	26	27	28	29
U	Ü	V	Y	Z	
30	31	32	33	34	

The numerical equivalent of each letter of the word to be encrypted is found with the help of Table 2. Then the CFE of each natural number is calculated by Theorem 2. These CFEs are given in Table 1. Then the symbols in the CFEs are purified and the numerical equivalent of the letters is found. The most important point to note here is that since $\sqrt{26}$ continued fractional expansions start with 5, the last term ends with 10. Since the last digit is a two-digit natural number, it causes an error while deciphering. Only the number 0 was used instead of the number 10 to provide uniform deciphering. Anyway, there is no probability that any other term will be 0 in the $\sqrt{d} = [a_0, \overline{a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, 2a_0}]$ expansion, including $a_0 = \lfloor \sqrt{d} \rfloor$ because it is $a_i > 0$ for $i \geq 1$.

Now, let's give an example of a word encrypted with continued fractions.

Example 2. Encrypt the message "CODES" by using CFE cipher.

Solution 2. First, let's find the numerical equivalent of each letter with the help of Table 2.

"C = 5", "O = 22", "D = 7", "E = 8", "S = 27"

Now the c. f. expansion of the square root of these numbers should be calculated using Theorem 2 or found by using Table 1. Then we get

"C = $\sqrt{5} = [2, \overline{4}]$ ", "O = $\sqrt{22} = [4, \overline{1, 2, 4, 2, 1, 8}]$ ",

"D = $\sqrt{7} = [2, \overline{1, 1, 4}]$ ", "E = $\sqrt{8} = [2, \overline{1, 4}]$ ",

"S = $\sqrt{27} = [5, \overline{5, 10}]$ ".

Now it should be examined whether any CFE contains 10. Since the letter S contains 10, the last digit must be coded by writing 0 instead of 10. Therefore, the encrypted form of the letters is

"C = 24", "O = 4124218", "D = 2114",

"E = 214", "S = 550".

As a result, the encrypted form of the word "CODES" is

"24 4124218 2114 214 550".

In this part, the encrypted text will be deciphered by means of CFE.

Existence: According to Theorem 1, $[a_0, a_1, \dots, a_n, \dots]$ infinite continued fraction is irrational[21].

Uniqueness: According to Theorem 1, since CFE is unique, every infinite continued fraction has a unique irrational number equivalent[21].

Firstly, it should be checked whether the number to be decoded contains the number 0. If it does not contain 0, then there isn't any problem.

The first part of the given number is written as an integer part and the next part as repeating part. As a result; CFE is found. If it contains 0, then we write this digit as the natural number 10 instead of 0. Then, this number is written in Definition 1 format. After the format is arranged, the CFE will be calculated or Table 1 will be used. You will find non-square number for every CFE. Finally, by using Table 2, we find out which number corresponds to the letter. Thus, it is uniquely deciphered.

Example 3. The following array is the ciphertext of a message encrypted with CFE cipher:

"24 4124218 2114 214 550"

Decrypt the message.

Solution 3. First, it should be examined whether any numbers contain 0. There is a "0". Since the last number letter contains 0, the number in the last digit should be 10 instead of 0. Now, each number is written as a CFE. For this, the first digit of the number should be written as the integer part of the continued fraction and the next part should be written as a repeating part. This message can be arranged in the form of

"24 = $[2, \overline{4}]$ ", "4124218 = $[4, \overline{1, 2, 4, 2, 1, 8}]$ "

"2114 = $[2, \overline{1, 1, 4}]$ ", "214 = $[2, \overline{1, 4}]$ ",

"550 = $[5, \overline{5, 10}]$ ".

Now we will write in the form of fractions them and find irrational number values.

$$[2, \overline{4}] = 2 + \frac{1}{4 + \frac{1}{4 + \frac{1}{\ddots}}} = \sqrt{5}$$

$$[4, \overline{1, 2, 4, 2, 1, 8}] = 4 + \frac{1}{1 + \frac{1}{2 + \frac{1}{4 + \frac{1}{2 + \frac{1}{1 + \frac{1}{8 + \frac{1}{1 + \frac{1}{\ddots}}}}}}}} = \sqrt{22}$$

$$[2, \overline{1, 1, 4}] = 2 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{4 + \frac{1}{1 + \frac{1}{\ddots}}}}} = \sqrt{7}$$

$$[2, \overline{1,4}] = 2 + \frac{1}{1 + \frac{1}{4 + \frac{1}{1 + \frac{1}{\ddots}}}} = \sqrt{8}$$

$$[5, \overline{5,10}] = 5 + \frac{1}{5 + \frac{1}{10 + \frac{1}{5 + \frac{1}{\ddots}}}} = \sqrt{27}$$

So, we get the numbers “5-22-7-8-27”. By using Table 2, it can be seen here

“C = 5”, “O = 22”, “D = 7”, “E = 8”, “S = 27”.

As a result, the decrypted message is “CODES”.

Conclusion

By using CFE, each word can be encrypted and deciphered uniquely. Since letters are converted into numbers with this encryption method, they can be easily integrated and used in digital systems. This encryption may be preferred for digitizing and storing electronic information. If the encryption method used in this study is used alone, its security will be low. Instead, encryption will increase security if used several times or combined with other encryption methods. With this encryption method, it will take a long time to fully decipher the text encrypted with existing programs. In addition, this study is open to improvement, considering the features and usage patterns of continued fractions and other encryption methods. This encryption method is weaker than encryption methods such as RSA, AES, but stronger than primitive encryption methods. The longer the password, and the more times the method is applied in succession, the longer it will take to crack. The password is not unbreakable, but it may require a very fast computer and a long time depending on the process applied.

References

- [1] Collins, D. C., “Continued Fractions,” *The MIT Undergraduate J. of Mathematics*, vol. 1, pp. 11-20, 1999.
- [2] Kline, M., *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times*, New York, USA: Oxford University Press, 1972.
- [3] Koshy, T., “Fibonacci and Lucas Numbers with Application”, New York, USA: Wiley, 2001.
- [4] Brezinski, C., “History of Continued Fractions and Padé Approximants”, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1990.
- [5] Özyılmaz, C., Nallı, A., “Restructuring of Discrete Logarithm Problem and Elgamal Cryptosystem by Using the Power Fibonacci Sequence Module M”, *Journal of Science and Arts*, ss. 61-70, 2019.
- [6] Koblitz, N., “Elliptic Curve Cryptosystems”, *Mathematics of Computation*, 48, 203-209, 1987.
- [7] Basu, M., Prasad, B., “The Generalized Relations Among the Code Elements for Fibonacci Coding Theory”, *Chaos Solitons Fractals*, 41, no.5, 2517-2525, 2019.
- [8] Prajapat, S., Jain, A., Thakur, R. S., “A Novel Approach For Information Security With Automatic Variable Key Using Fibonacci Q-Matrix”, *IJCCT* 3, no. 3, 54–57, 2012.
- [9] Prasad, B., “Coding Theory on Lucas p Numbers”, *Discrete Mathematics, Algorithms and Applications*, 8, no.4, 2016.
- [10] Stakhov, A., Massingue, V., Sluchenkov, A., “Introduction into Fibonacci Coding and Cryptography”, Osnova, Kharkov, 1999.
- [11] Stakhov, P., “Fibonacci matrices, a Generalization of the Cassini Formula and a New Coding Theory”, *Chaos Solitons Fractals*, 30, no. 1, 56–66, 2006.
- [12] Kodaz, H., Botsalı, F. M., “Simetrik ve Asimetrik Şifreleme Algoritmalarının Karşılaştırılması”, *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi*, 9, 10-23, 2010.
- [13] Kraft J. S., Washington L. C., “An Introduction to Number Theory with Cryptography”, Boca Raton, New York, London, CRC Press Taylor & Francis Group, 2014.
- [14] Stinson, D. R., “Cryptography Theory and Practise. 3. edition”, London, England: Chapman & Hall/CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.
- [15] Kahn, D., “The Codebreakers”, New York, USA: The Macmillan Company, 1996.
- [16] Stinson, D. R., “Cryptography Theory and Practice”, New York, USA: Chapman & Hall/ CRC, 2002.
- [17] National Bureau of Standard., Data Encryption Standard, Federal Information Processing Standards, NBS., 1977.
- [18] Mollin, R. A., “An Introduction to Cryptography”, Boca Raton, New York, London, Chapman and Hall/CRC, 2006.
- [19] Redmond, D., “Number Theory: An Introduction”, New York, USA: Markel Dekker, Inc, 1996.
- [20] Adler, A., Cloury, J.E., “The Theory of Numbers, A Text and Source Book of Problems”, Boston, London, Singapore, Jones and Bartlett Publishers, 1995.
- [21] Mollin, R. A., “Fundamental Number Theory with Applications”, Boca Raton, New York, London, Tokyo, CRC Press, 1998.
- [22] Kalman, D., Mena, R., “The Fibonacci Numbers Exposed”, *Mathematics Magazine*, 76, 2003.
- [23] Wiener M. J., “Cryptanalysis of short RSA secret exponents”, *IEEE Transactions on Information Theory*, 36, 553-558, 1990.



Bitki fabrikalarında kontrol edilen parametreler ve kontrol yöntemleri

*Controlled parameters and control methods in plant factories*Sinem Seyhan^{1*}, T. Gökürk Seyhan², Hasan H. Silleli³, Hasan Yılmaz⁴¹ Ankara Üniversitesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, sinem.seyhan@ankara.edu.tr
ORCID: 0000-0002-2252-7335² Ankara Üniversitesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, seyhan@ankara.edu.tr
ORCID: 0000-0003-4622-6059² Ankara Üniversitesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, sinem.seyhan@ankara.edu.tr
ORCID: 0000-0003-2242-3402² Bahar Aydınlatma, hasan@baharaydinlatma.com.tr
ORCID: 0000-0001-8577-0327

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 22 Şubat 2022
Revizyon 3 Mayıs 2022
Kabul 21 Mayıs 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

Bitki fabrikası, dikey tarım, yapay
aydınlatma, yetiştiricilik
otomasyonu

ÖZ

Dünya nüfusu giderek artarken, kişi başına düşen sebze tüketimi de yükselen bir trend göstermektedir. Buna karşın bitkisel üretim alanları ve verim aynı ölçüde artmamaktadır. Birim alandan alınacak verimi artırmak için iyi bir çözüm olan bitki fabrikaları tarım alanlarına ve seralara kurulabileceği gibi, bina otoparkları, çatı katları, âtil araziler ve nakliye konteynerleri gibi alanlara inşa edilebilir. Bu kontrollü ve kapalı alanlarda ışık, sıcaklık, nem, hava hareketi, karbondioksit konsantrasyonu gibi parametreler hassas şekilde takip ve kontrol edilmelidir. Bitki fabrikalarının son dönemde popülerleşmesiyle birlikte bu konuda yapılan çalışmalar artış göstermektedir. Günümüzde hem dünyada hem de ülkemizde araştırmacıların, yatırımcıların ve tüketicilerin ilgisini çekmekte ve giderek yaygınlaşması beklenmektedir. Bu çalışmada bitki fabrikalarında kontrol edilen başlıca parametreler ve bu parametrelerin kontrol yöntemleri ile ilgili bilgiler verilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 February 2022
Received in revised form 3 May 2022
Accepted 21 May 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Plant factory, vertical farming,
artificial lighting, growing
automation

ABSTRACT

While world population is increasing, per capita vegetable consumption also shows an increasing trend. On the other hand, plant production areas and yield do not increase to the same extent. Plant factories, which are a good solution to increase the efficiency of the production area, can be installed in agricultural areas and greenhouses, as well as in areas such as parking lots, attics, idle lands, and shipping containers. Parameters such as light, temperature, relative humidity, air movement and carbon dioxide concentration must be precisely monitored and controlled at these areas. With the increasing popularity of plant factories recently, studies on this subject are increasing. Today, it attracts the attention of researchers, investors, and consumers both in the world and in Turkey, and it is expected to become increasingly widespread. In this study, information about the main parameters controlled in plant factories and the control methods of these parameters are given.

Doi: 10.24012/dumf.1058651

* Sorumlu Yazar

Giriş

Dünya nüfusunun 2050 yılında yaklaşık 9 milyar, Türkiye nüfusunun ise yaklaşık 97 milyon olması beklenmektedir [1]. Dünyada kişi başına düşen meyve ve sebze tüketimi yükselen bir trend göstermektedir. Giderek artan tüketim eğilimi ve üretim ihtiyacına karşılık üretim alanları ve üretim alanlarından elde edilen verim aynı ölçüde artmamaktadır [2]. Bunun önemli sebeplerinden biri tarım arazilerinin kısıtlı olmasıdır. Artan talebe karşılık tarımsal üretim alanlarının kısıtlı olması alternatif üretim alanlarına ve alternatif yöntemlere olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu sebeple geleneksel üretim artık yerini yoğun girdi kullanılan üretim yöntemlerine bırakmıştır.

Dünyada yoğun üretim alanları 20. yüzyıl başlarında önem kazanmaya başlamıştır. Geleneksel tarımsal üretim alanlarının azalmasına karşılık tüketim ihtiyacının artması ile günümüzde örtü altı bitkisel üretim sektörü dünya üzerinde hızlı değişim görülen bir sektör olarak nitelendirilebilir. Küreselleşme ve bunun dünya üzerinde değişik bölgelerdeki gelire olan etkisine bağlı olarak çoğu ülkede kişi başına düşen bitkisel tüketiminin arttığı görülmektedir. Buna bağlı olarak dünya üzerindeki rekabet de artmaktadır.

Bitki fabrikaları, geleneksel tarıma oranla daha kontrollü ve dış koşullardan bağımsız olması sebebiyle daha uzun süreli ve yoğun üretim yapılabilen, dolayısıyla birim alanda karlılığın ve kalitenin geleneksel üretime göre daha yüksek olduğu bir üretim şeklidir. Bitki fabrikaları temelde üretim için elverişli olmayan yerlerde ya da zamanlarda üretim yapmak için uygun yapay koşullar oluşturulması prensibine dayanır.

Bitki Fabrikalarının Önemi

Bitki fabrikalarında ürün yetiştiriciliğinin geleneksel üretime kıyasla çok sayıda avantajı bulunmaktadır. Yoğun ve kontrollü girdi kullanımı sayesinde birim alandan alınan verim yüksektir. Birimden alınan verimin artışına karşın su tüketiminde %95'e varan tasarruf sağlanabilmektedir.

Kullanılan vejetatif materyal ve üretim araçları temiz olduğu sürece hastalık, zararlı ve pestisitten arı üretim yapılabilmektedir. Ürünler hasat edilmesinin ardından herhangi bir bekleme ve işleme süresine maruz kalmadığından raf ömrü geleneksel üretimden elde edilen ürünlere göre daha yüksektir. Bu üretim sisteminin şehir tarımına uygun olması ve tüketim alanlarına yakınlığı sayesinde maliyetlerde düşüş gözleneceği düşünülmektedir. Kapalı sistemler kullanılarak dış koşullardan bağımsız şekilde üretim yapılabilmektedir. Ürün programlaması yapılarak aynı anda farklı türlerin üretilebilmesi mümkündür.

Her yüksek teknoloji işletme gibi bitki fabrikalarının kurulumu da geleneksel sistemlerle karşılaştırıldığında yüksek maliyetlidir. Gerekli durumlarda bakım ve onarım giderleri de yüksek olmakta ve bu işlemlerin teknik bilgi sahibi uzmanlar tarafından yapılması gerekmektedir. Aynı şekilde sistemin işletilmesi sırasında da nitelikli elemana ihtiyaç duyulmaktadır. Aktif çalışan bir bitki fabrikasının yoğun enerji ihtiyacı bulunmakta ve bu durum giderleri yükseltmektedir.

Bitki Fabrikalarında Yetiştiricilik Prensipleri

Bitki fabrikaları, iklime bağlı kalmadan tüm yıl boyunca standart kalite ile sebze, meyve ve çiçeklerin yetiştirildiği, çevre şartları kontrol edilebilen ve düzenlenebilen üretim alanlarıdır. Bitki fabrikalarında, bitki gelişimi ve büyümesi için gerekli olan iklim parametrelerinin doğru yönetimi ile ekonomik ve verimli üretim yapmak mümkündür.

Bitki fabrikaları, topraksız tarım yöntemi kullanarak bitki üreten tesislerdir. Bu yöntemde, bitkilerin gelişimi için gerekli olan bitki besin elementleri ve su, toprak dışında farklı katı veya sıvı ortamlar kullanılarak bitki kök bölgesine ulaştırılmaktadır. Topraksız üretim modelinde, bitki kök bölgesinde en uygun su, besin, tuzluluk ve hava dengesinin korunması ve bitkinin büyüme dönemine göre düzenlenmesi amaçlanmaktadır.

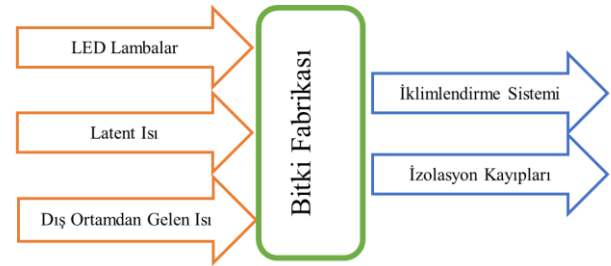
Kontrol Edilen Parametreler

Sıcaklık

Bitki fabrikalarında sıcaklığı açıklarken iki terimden bahsetmek gerekir. Bunlardan ilki olan duyulur ısı, bir nesnenin sıcaklığında değişime neden olan ısıdır. Duyulur ısının transferi ışıma, kondüksiyon ya da konveksiyon yoluyla gerçekleşir. Diğer bir ısı türü olan latent (gizli) ısı ise ortamdaki suyun buhara dönüşürken aldığı enerji ve dolayısıyla ortamda oluşturduğu ısı yüküdür. 1 g su 25 °C'de buharlaşırken 2436 J enerjiye ihtiyaç duyar. Bitkinin stomalarından buharlaştırılan su sayesinde yaprak sıcaklığının bir kısmı suya verilmiş olur ve bu sayede bitki serinler. Gizli ısıyı oluşturan su buharının soğutma sisteminde tekrar suya dönmesi ile üzerindeki enerji alınıp dış ortama atılmaktadır.

Sıcaklık isteği bitkilerin büyüme dönemlerine göre değişmekle birlikte bitki fabrikalarında çoğunlukla 10 – 30 °C seviyelerinde istenmektedir. Sıcaklık yüksek olduğunda bitkilerin gelişim hızı, solunum hızı, meyve büyüme hızı ve olgunlaşma hızı düşmektedir.

Üretim alanlarında ısı girişi ve ısı kaybı çeşitli şekillerde olabilmektedir (Şekil 1). Bitki fabrikalarında soğutma ihtiyacı, ortama verilen ısı ile dış ortamdan gelen ısının toplamına göre belirlenir [3].



Şekil 1. Bitki fabrikasında ortama verilen ve ısıyı uzaklaştıran etmenler.

Ortama verilen ısının büyük bir bölümünü LED (Light Emitting Diode – Işık Yayan Diyot) lambalardan açığa çıkan ısı oluşturur. Aydınlatmanın, elektriğin birim fiyatının daha ucuz olduğu gece tarifesinde yapılması önerilmektedir. Bu sayede enerji maliyeti düşerken aynı zamanda en yüksek

ısının ortaya çıkmasına neden olan LED lambaların, solar radyasyonun olmadığı gece saatlerinde yanması sağlanır. Kullanılacak soğutma sistemi, aydınlık periyotta ortaya çıkan ısıyı dışarı atabilecek kapasitede seçilmelidir. Karanlık periyotta ortaya çıkan ısı miktarı aydınlık periyodun ancak % 1 – 2’si kadardır [4].

Aydınlatmanın gece çalıştırılması ile ısıtma ihtiyacı da ortadan kaldırılmış olur. Birçok bitki fabrikasında ısıtma ihtiyacı bulunmamaktadır. Gerekli durumlarda aydınlatma devreye alınarak ısıtma ihtiyacı karşılanabilmektedir.

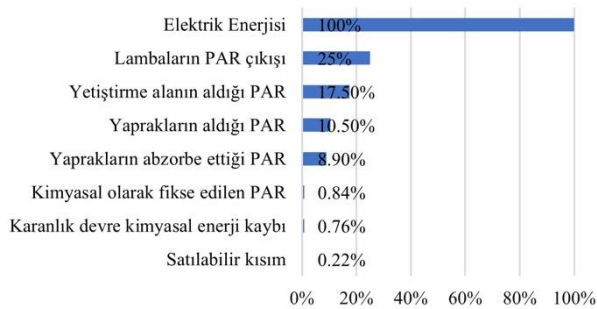
Bitki fabrikalarında sıcaklığın kontrolü zamana bağlı ayar değerleri değişen PID (Proportional Integral Derivative – Oransal İntegral Türevsel) tarzında çalışan bir otomasyon unsuru olarak tercih edilmektedir. Bitki fabrikasının çeşitli yer ve yüksekliklerine yerleştirilen sensörler aracılığıyla ölçülen sıcaklık değeri ile ayarlanan sıcaklık değeri arasındaki farka göre ısı pompasının çalışıp çalışmayacağına veya ne hızda çalışacağına algoritma tarafından karar verilir. Gece sıcaklığının düşük, gündüz sıcaklığının yüksek ayarlandığı bu sistemlerde sıcaklığın düşme ve yükselme hızları da seçilebilir yapıda olmalıdır. Sıcaklığın yavaş yavaş düşürülüp yükseltilmesi, bağıl nemin yoğunlaşma olmadan sağlıklı bir şekilde ayarlanmasını sağlarken bitkilerin de soğuk şoku yaşamalarını engeller.

Aydınlatma

Bitkiler, ışık enerjisini kullanarak fotosentez yapar. Fotosentez sayesinde ihtiyaç duyduğu bileşenleri sentezler ve büyür.

Bitkiler ışığı yalnızca fotosentez yapmak için değil aynı zamanda sirkadiyen ritmi takip etmek için de kullanır. Tanigaki ve Fukuda tarafından yürütülen araştırmada; sürekli aydınlık, 20 saat, 24 saat ve 28 saat olmak üzere 4 farklı gün uzunluğunun marul (*Lactuca sativa* L.) bitkisi üzerindeki etkilerini incelemiş ve en yüksek yaş ağırlığının 24 saatlik gün uzunluğuna maruz kalan bitkilerde olduğu bulunmuştur [5]. Bu araştırma sonucunda bitkilerin sirkadiyen ritmine en uygun gün uzunluğunun 24 saat olduğu belirlenmiştir.

Bitki fabrikalarında kullanılan aydınlatma elemanlarının kullandığı elektrik enerjisinin PAR’a (Photosynthetic Active Radiation – Fotosentetik Aktif Radyasyon) ve sonrasında satılabilir ürüne dönüşme aşamalarının verim çizelgesi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Elektrik enerjisinin satılabilir bitkiye dönüşme verimleri [6].

Bitkiler, tür ve çeşitlerine göre farklı şiddette ve spektrumda ışığa ihtiyaç duymaktadırlar. İhtiyaç duyulan “Fotosentetik Foton Akısı Yoğunluğu” (PPFD); yaprağı yenen sebzeler için $100 - 300 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, meyvesi yenen sebzeler için $200 - 600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, süs bitkileri için ise $50 - 200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ olarak bildirilmiştir [4]. Bitki fabrikalarında genellikle yaprağı yenen sebzelerin yetiştirilmesi, düşük ışık akısı yoğunluğu ihtiyaçlarından ve kısa yetiştirme periyoduna sahip olmasından ileri gelmektedir. Meyvesi yenen sebzeler ve çiçeklerin, mümkün olduğunca doğal aydınlatma (güneş) kullanılarak yetiştirilmesi maliyetlerin düşürülmesini sağlamaktadır.

Gün boyunca alınan kümülatif foton miktarı, bitkinin verimi ve kalitesini doğrudan etkilemektedir [7]. Gün boyunca alınan foton miktarının ifadesinde DLI (Daily Light Integral – Günlük Işık İntegrali) yöntemi kullanılır. DLI hesaplama yöntemi Denklem (1)’de verilmiştir. Bu yöntemde bitkinin ihtiyacı olan kümülatif foton akısı miktarının gün içindeki aydınlık periyotta toplanması amaçlanır.

$$DLI (\text{mol m}^{-2}) = 3.6 \times 10^{-3} \times PPFD (\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}) \times \text{süre} (h) \quad (1)$$

Bitki fabrikalarında yetiştirmeye uygun bazı bitki gruplarının günlük foton ihtiyacı Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Yaygın olarak yetiştiriciliği yapılan bazı bitki gruplarının DLI istekleri [8].

Bitki	DLI İsteği (mol m^{-2})
Çelikler	4 – 10
Fideler	6 – 15
Soğanlılar	6 – 15
Kesme Çiçekler	15 – 25
Yaprağı Yenen Sebzeler	12 – 17
Çilek	15 – 20
Meyvesi Yenen Sebzeler	20 – 30

Yapay ışık kaynağı olarak ilk zamanlarda kullanılan yüksek maliyetli ve düşük verimli sodyum buharlı lambalar yerine 2000’li yıllarda daha az ısı üreten ve yapısal olarak daha az yer kaplayan floresan lambaların kullanılmasıyla katlı üretim sistemlerinin kurulması mümkün olmuştur. Günümüzde düşük maliyete ve yüksek verime sahip LED lambaların kullanımı yaygınlaşmıştır. LED lambaların kullanılmasının başlıca nedenleri Tablo 2’de bitki fabrikalarında kullanımı yaygın olan floresan lambalar ve HPS (High Pressure Sodium – Yüksek Basıncılı Sodyum) lambalar ile kıyaslamalı olarak gösterilmiştir.

Tablo 2. Bitki fabrikalarında yaygın kullanılan lambalar ve özellikleri

Özellik	LED	Floresan	HPS
Kurulum maliyeti	Yüksek	Düşük	Yüksek
İşletme maliyeti	Düşük	Yüksek	Yüksek
Spektrum	İsteğe Bağlı	Sabit	Sabit
Verim	Yüksek	Düşük	Düşük
Yapı	Basit	Karmaşık	Basit
Nem dayanımı	Yüksek	Orta	Orta
Ömür	Yüksek	Orta	Düşük

Bitki fabrikalarında aydınlatma, tamamen yapay olduğundan otomasyon programı tarafından herhangi bir sensör verisine bağlı kalmadan, aç/kapa mantığında çalışan bir algoritma ile kontrol edilmektedir. Aydınlatmanın açılacağı ve kapanacağı saatler otomasyon programında tanımlanmalıdır.

Bağıl Nem

Su, bitkinin temel yaşam kaynağıdır. Bitkilerin %85 – 95 kadarı sudan oluşmaktadır. Bitkinin su alımı ve su kaybı dengede olmadığında bitkilerde ölüme kadar giden farklı negatif fizyolojik olaylar gözlenmektedir. Atmosferde suyun sis, bulut, yağmur, kar gibi çeşitli formlarda bulunmakla birlikte sürekli yer ve faz değiştirdiği ve oransal olarak %4 civarında olduğu bilinmektedir. Nem, suyun gaz halinin bir ifadesidir. Bağıl nem, havanın içindeki su buharı miktarının, o anki sıcaklıkta taşıyabileceği en yüksek nem miktarına oranıdır. Bitki fabrikalarında bağıl nem seviyesi %70 – 85 aralığında olmalıdır. Bağıl nem düşük olduğunda transpirasyon artmaktadır. Transpirasyonu etkileyen diğer faktörler; güneş ışınımı, yaprak stomalarının pozisyonu, hava sıcaklığı kök bölgesindeki su miktarı, yaprak yüzey alanı ve hava hızıdır. Bağıl nem fazla olduğunda ise bitkinin dış faktörlere duyarlılığı ve zararlanma olasılığı artmaktadır.

Bitki fabrikalarında bağıl nemin artırılmasında genellikle ultrasonik sisleyiciler ile oluşturulan soğuk buhar kullanılmaktadır. Bu soğuk buhar doğrudan hava taşıyan kanallara verilebileceği gibi, sirkülasyonun fazla olduğu bir bölgede de ortama verilebilir.

Isı pompası ile soğutma yapıldığında bağıl nemin bir kısmı evaporatörde yoğunlaşarak tekrar su halini alır. Dolayısıyla soğutma yapılırken mutlak nem seviyesi düşmektedir. Bu su sistemden dışarı atılabileceği gibi toplanarak sulama ve nemlendirme için kullanılarak tasarruf sağlanabilmektedir.

Hava Hareketi

Hava hızı, havanın bir saniyede kat ettiği mesafeyi yön ile birlikte metre cinsinden bildirmektedir. Bitki fabrikalarında hava hareketi dış koşullara göre çok daha azdır. Bitkilerin gelişme ortamında hava hızı yetersiz olduğunda havadaki nem bitki üzerinde yoğunlaşmakta ve bitkinin gaz geçişiminde engel oluşturmaktadır. Gaz alışverişini iyi sağlayamayan bitkilerde fotosentez, solunum, terleme gibi yaşamsal faaliyetlerin doğru şekilde yapılamaması bitkilerde büyüme ve gelişim geriliğine sebep olmaktadır. Aynı zamanda hava hareketinin yetersiz olduğu bitkisel üretim alanlarında hastalık ve zararlıların yayılımı çok daha kolay olmaktadır. Hava hızı anemometreler kullanılarak ölçülmekte ve fanlar yardımı ile gerekli hava hareketi sağlanabilmektedir. Optimum büyüme için $0.15 - 0.3 \text{ m s}^{-1}$ hava hızı uygun kabul edilir [9]. Hava hareketinin sağladığı transpirasyon, bitkinin karbondioksit alımını ve dolayısıyla büyümeyi teşvik eder. Aynı zamanda hava hareketi ortamdaki havayı karıştırarak homojen hale getirir.

Bitki fabrikalarında hava hareketi, çeşitli yerlere yerleştirilen fanlar ile sağlanmaktadır. Fanlar sürekli olarak çalışır konumda tutulabileceği gibi doğayı taklit edecek biçimde bir zamanlayıcıya bağlı olarak aç/kapa mantığında da kontrol edilebilir. Eşit aralıklı açık ve kapalı süreler tercih edildiğinde enerji ihtiyacının %50 azalacağı ön görülmektedir.

Fanların yerleşiminde tüm bitkilere hava hareketi ulaşacak şekilde bir yerleşim tercih edilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda dikey hava hareketinin yatay hava hareketine göre daha verimli olduğu bildirilmiştir [9], [10], [11]. Özellikle marul gibi içten dışa doğru büyüyen bitkilerde hava hareketinin yukarıdan aşağıya doğru olması tüm yaprakların hava hareketine maruz kalmasını sağlar.

Karbondioksit Konsantrasyonu

Karbondioksit havada doğal olarak bulunan renksiz, kokusuz ve yanıcı olmayan bir gazdır. 2019'da küresel ortalama atmosferik karbondioksit, 0.1 ppm'lik bir hata payı içermekle birlikte 409.8 ppm olarak belirlenmiştir. Günümüzde atmosferdeki karbondioksit seviyesi son 800000 yılın en yüksek değerine ulaşmıştır [12]. Karbondioksit konsantrasyonu bölgeye, günün saatine, mevcut insan, hayvan ve bitki yoğunluğuna göre değişiklik göstermektedir. Bitkiler fotosentez sırasında karbondioksit kullanmakta, solunum sırasında ise üretmektedir. Ortamda bulunan karbondioksit yoğunluğundaki değişiklikler bitki aktivitesi üzerinde doğrudan etkilidir. Entansif üretim yapılan alanlarda karbondioksit dış ortama göre düşük konsantrasyonda bulunmaktadır. Birçok bitki türünde optimum karbondioksit konsantrasyonu 600 – 1600 ppm olarak bildirilmektedir [13]. Bitki fabrikalarında genel olarak 600 – 1000 ppm aralığında karbondioksit gübrelemesi yapmak gerekmektedir. Karbondioksit ölçümü için kullanılan sensörler bir kızılötesi kaynağı, bir ışık tüpü, bir dalga boyu filtresi ve kızılötesi detektör içeren algılayıcılardır. Ölçüm için tüpe gaz verilir ve kızılötesi ışığın ne kadarının gaz tarafından absorbe edildiği tespit edilir [14]. Doğru ölçüm için algılayıcıların insan solunumu ve hareketi tarafından manipüle edilmeyecek yerlere yerleştirilmesi gerekmektedir. Ortamda konsantrasyonun yeterli olmadığı durumlarda karbondioksit enjeksiyonu ile zenginleştirme yapılmaktadır.

Karbondioksit enjeksiyonunda kullanılabilecek kontrol yöntemi, alt ve üst sınır değerleri ayarlanmış bir aç/kapa algoritmasıdır. Geri besleme için kullanılacak değer sensör veya sensörler tarafından ölçülen karbondioksit konsantrasyonu verisidir.

Bazı bitki fabrikalarında elektrik üretimi için jeneratör veya doğalgaz dönüşüm santrali kullanılmaktadır. Bu tip enerji üretim tesislerinden açığa çıkan atık ısının ve karbondioksitin de bitki fabrikasında kullanılması ile kojenerasyon ve trijenerasyon mümkün olmaktadır [3].

Hava Değişimi

Hava değişimi, ortamdaki havanın temiz hava ile değiştirilmesi işlemidir. Kapalı sistem bitkisel üretim alanlarında hava hacmi, dış koşullar ve bitki istekleri dikkate alınarak hava değişimi yapılmaktadır. Hava değişimi sayısının bitkileri hastalık etmenleri ve zararlılardan koruyacak kadar az olması fakat nem ve etilen birikimini önleyebilecek şekilde hesaplanması gerekmektedir [14]. İyi yalıtılmış sistemlerde bu değer $0.01 - 0.02 \text{ h}^{-1}$ olarak bulunmuştur [15].

Bitki fabrikalarında hava değişimi miktarı, havayı ortamdan dışarı atan fanın debisi kullanılarak ölçülmektedir. Hava değişim sayısı Denklem 2 ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Hava değişim sayısı (h}^{-1}\text{)} = \text{Fan debisi (m}^3\text{h}^{-1}\text{)} / \text{Hacim (m}^3\text{)} \quad (2)$$

Hava değişimi sayısını doğru belirlemek bitki gelişimini olumlu etkilemektedir.

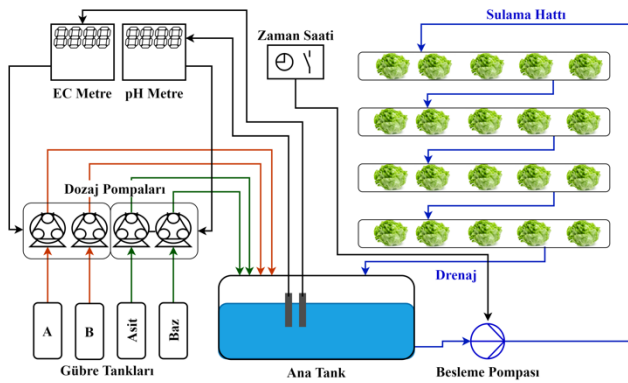
Bitki fabrikalarında hava değişimi için kullanılacak kontrol yöntemi, havayı dışarı atan fanın debisi ile ilişkilidir. Seçilen fanın debisi ile istenen hava değişim sayısı tam örtüşüyorsa fan sürekli olarak çalıştırılmalıdır. Ancak seçilen fan debisi, istenen değişim sayısından fazla olacak şekilde ise fan, bir zamanlayıcı algoritma ile bekleme süresi sonrasında bir süre çalıştırılarak gerekli hava değişimi sağlandığında kapatılacak şekilde programlanabilmektedir.

İçeri taze havanın alınmasında ise iklimlendirme sistemi üzerindeki damperlerden faydalanılabilmektedir. Damperlerin pozisyonu dış ortamdan hava alacak şekilde ayarlandığında taze hava girişi mümkün olmaktadır.

Fertigasyon

Fertigasyon, bitki besin maddelerinin sulama suyu ile birlikte bitki kök bölgesine ulaştırılmasıdır. Topraksız tarımda fertigasyon işlemi bitki besin maddeleri; doğru ayarlanmış oranlarda, bitki tüketimi göz önünde bulundurularak ve doğru pH aralığında verilmelidir. Bitki fabrikalarında genellikle aynı sulama suyunun sürekli olarak dolaştırılması esasına dayanan geri dönüşümlü sulama sistemi kullanılır. Bu tip sulama sisteminde bitki raflarından dönen su, basit bir filtrelmeye tabi tutularak raflardan gelen kök parçaları ve yabancı maddeler ayrılır. Daha sonra UV filtreden geçerek su içindeki hastalık etmenlerinin elimine edilmesi sağlanarak tanka geri verilir. Bitki fabrikalarında sudan yararlanma etkinliğinin 0.93 – 0.98 arasında olduğu ve seralarda yapılan bitkisel üretimde bu değerin 0.02 – 0.03 olarak hesaplandığı bildirilmiştir. Bitki fabrikaları, seralara kıyasla 30 ila 50 kat daha az su tüketmektedir [16] [17].

Besin maddeleri içerisinde bulunan bazı iyonlar bir araya geldiğinde çökelti oluşturmaktadır. Bu durumun önüne geçmek için besin maddeleri A ve B olarak farklı tanklarda çözülür. Ayrıca pH ayarlaması için bir asit ve bir baz tankı bulunur. Bu tanklardan, yapılan EC (Elektriksel İletkenlik) ve pH ölçümlerine göre dozaj pompaları aracılığıyla ana sulama tankına ekleme yapılır (Şekil 3).



Şekil 3. Bitki fabrikalarında kullanılan fertigasyon sistemi

Gübreleme otomasyonunda PID tabanlı kontrol algoritmaları kullanılmaktadır. Bu algoritma ile EC ve pH'ın

ani olarak değişmesinin önüne geçilerek daha stabil bir besin çözeltisi oluşturulmaktadır.

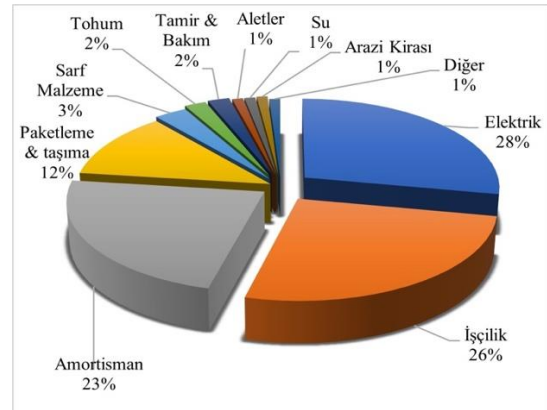
Sulama otomasyonunda besleme pompası bir zamanlayıcı algoritmayla kontrol edilmektedir. Pompanın yeterli miktarda suyu basacak kadar çalışması ve ardından basılan suyun geri dönüşüne izin verecek kadar beklemesi, en verimli sulama şeklidir. Bu şekilde aç/kapa mantığında çalışan pompalar ile enerji tüketimi azaltılmaktadır.

Bitki besin maddeleri solüsyonları minimum kanunu esas alınarak hazırlanmaktadır. Bitkinin kök bölgesinde bulunmasını istediği bitki besin maddesi konsantrasyonu ile ortamdaki kaldırdığı bitki besin maddesi miktarının farklı olduğu, yapılan araştırmalar sonucunda belirlenmiştir. Sulama suyunun sürekli devridaim edilmesine dayanan sulama yönteminde gübrelerden gelen bitki besin maddelerinin ortama verildiği oranda tüketilmemesiyle bazı bitki besin maddelerinde birikme gözlemlenmekte ve sonucunda da uç yanıklığı (tipburn) gibi bazı hastalıkların oluşmasına zemin hazırlanmaktadır. Bu durumun önüne geçmek için belirli aralıklarla sulama suyunun değiştirilmesi veya analiz edilerek birikme/eksilme görülen bitki besin maddelerine göre solüsyonların ayarlanması gerekmektedir.

Sonuç ve Öneriler

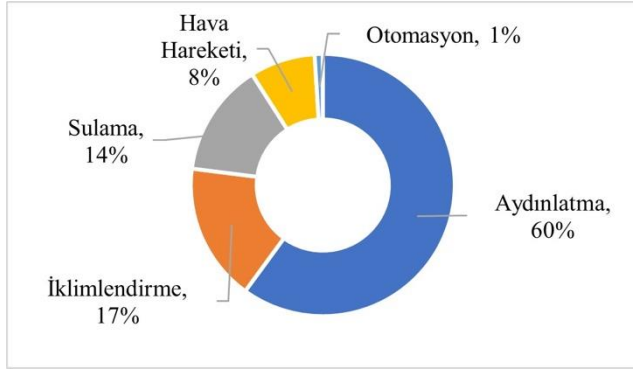
Bitki fabrikalarında birim alan başına verim geleneksel üretim yöntemi ve seralarda yapılan tek katlı üretime kıyasla çok daha yüksek olduğundan ve genellikle gerekli tüm koşullar yapay olarak sağlandığından bitki fabrikalarının yüksek ilk yatırım ve işletme maliyetleri bulunmaktadır. Bu maliyetlerden kaçınmanın bir sonucu olarak yıl boyu sağlıklı ve güvenli gıda üretimi ve su tasarrufu mümkün olmaktadır. Yapılan bir çalışmada, 1 hektarlık alanda yapılan hidroponik üretim ile 10 hektar alanda yapılan açıkta yetiştiricilik kıyaslandığında üretim miktarının aynı olmasının karşın 75000 ton su tasarrufu sağlandığı bildirilmiştir [18]. Kendine yeter bir dikey çiftliğin 9300 m² olması durumunda 15000 kişinin 2000 kcal olan günlük besin ihtiyacını karşılayabileceği belirtilmiştir [19]. Başka bir çalışmada mevcut 3 katlı ve toplam 450 m²'lik bir dikey çiftliğin 27 katlı prototipinin 15000 apartmanın ihtiyacını karşılayabileceği öngörülmüştür [20].

Bitki fabrikalarının kontrol mekanizmaları uzman kişiler tarafından geliştirilmeli ve denetlenmelidir. Bitki fabrikalarında giderlerin dağılımı Şekil 4'te gösterilmiştir [21].



Şekil 4. Bitki fabrikalarında giderleri dağılımı

Bitki fabrikalarında giderler dağılımı içerisinde en büyük pay elektrik harcamalarına aittir. Elektrik maliyeti içerisindeki kalemlerin dağılımı ise Şekil 5'te gösterilmiştir [22].



Şekil 5. Elektrik maliyeti içerisindeki kalemlerin dağılımı

Maliyetlerin yüksekliğini tolere edebilmek amacıyla ekonomik değeri yüksek olan tür ve çeşitlere yönelmek iyi bir seçenek olacaktır.

Tüketim alanları ile üretim alanlarının aynı yerde olması ile taşıma ve araçlar ile ilgili masrafların düşürülmesi mümkündür.

Yüksek bir gider kalemi olan aydınlatma ve iklimlendirme için harcanan enerjiden tasarruf sağlamak için mekanik hareketli sistemlerin geliştirilmesi bir çözüm olabilecektir.

Hareket mekanizmalı bir sistemle yetiştirme alanının daha verimli kullanılması, iş gücü ihtiyacının düşürülmesi ve dolayısıyla insan kaynaklı hataların azaltılması mümkündür.

Tüm bitkilerin yeterli ışık almasının sağlanması için çeşitli sistemler geliştirilerek enerji verimliliğinin artırılması gerekmektedir.

Kaynaklar

- [1] Birleşmiş Milletler, "World Population Prospects 2019," [Online]. Available: <https://population.un.org/wpp/>. [Accessed 25 06 2019].
- [2] FAO, "Food and agricultural projections to 2050," [Online]. Available: <http://www.fao.org/global-perspectives-studies/food-agriculture-projections-to-2050/en/>. [Accessed 15 05 2017].
- [3] R. Yokohama, "Energy Consumption and Heat Resources in Plant Factories," in *Plant Factory using Artificial Light*, Amsterdam, Netherlands, Elsevier Inc., 2019, pp. 177-184.
- [4] T. Wada, H. Fukuda and T. Ogura, "Fundamental Components and Points to Consider in the Design of a Plant Factory: An Example of OPU New-Generation Plant Factory," in *Plant Factory using Artificial Light*, Amsterdam, Netherlands, Elsevier Inc., 2019, pp. 231-241.
- [5] Y. Tanigaki and H. Fukuda, "Control Theory in the Metabolic Rhythms of Plants," in *Plant Factory using Artificial Light*, Amsterdam, Netherlands, Elsevier Inc., 2019, pp. 89-98.
- [6] T. Kozai and G. Niu, "Plant factory as a resource-efficient closed plant production system," in *Plant Factory*, Amsterdam, Netherlands, Elsevier Inc., 2020, pp. 93-115.
- [7] M. A. Dayıoğlu ve H. Silleli, "Seralar için Yapay Aydınlatma Sistemi Tasarımı: Günlük Işık İntegrali Yöntemi," *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, cilt 8, no. 2, pp. 233-240, 2012.
- [8] E. Runkle, "DLI 'Requirements'," May 2019. [Online]. Available: <https://gpnmag.com/article/dli-requirements/>. [Accessed 12 01 2022].
- [9] Y. Kitaya, J. Tsuruyama, M. Kawai, T. Shibuya and M. Kiyota, "Effects of Air Current on Transpiration and Net Photosynthetic Rates of Plants in a Closed Plant Production System," in *Transplant Production in the 21st Century*, Dordrecht, Netherlands, Springer, 2000, pp. 83-90.
- [10] E. Goto and T. Takakura, "Promotion of Ca accumulation in inner leaves by air supply for prevention of lettuce tipburn," *Transactions of the ASAE (USA)*, vol. 35, no. 2, pp. 647-650, 1993.
- [11] Y. Zhang and M. Kacira, "Environmental control of PFALs," in *Plant Factory Basics, Applications and Advances*, London, Academic Press, 2022, pp. 391-400.
- [12] R. Lindsey, "Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide," 14 08 2020. [Online]. Available: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>. [Accessed 12 01 2022].
- [13] D. Lange, G. Hack, N. Belker, M. Brockmann, O. Domke, S. Krusche, W. Sennekamp ve F. Viehweg, *Rationelle Energienutzung im Gartenbau*, Wiesbaden, Germany: Springer, 2002.
- [14] G. Niu, T. Kozai and N. Sabeh, "Physical environmental factors and their properties," in *Plant Factory*, Amsterdam, Netherlands, Elsevier Inc., 2020, pp. 185-195.
- [15] T. Kozai, "Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory,"

- Proceedings of the Japan Academy, Series B*, vol. 89, no. 10, pp. 447-461, 2013.
- [16] K. Ohyama, T. Kozai, C. Kubota, C. Chun, T. Hasewaga, S. Yokoi and M. Nishimura, "Coefficient of performance for cooling of a home-use air conditioner installed in a closed-type transplant production system," *Shokubutsu Kojo Gakkaishi*, vol. 14, no. 3, pp. 141-146, 2002.
- [17] T. Kozai, "Sustainable plant factory: closed plant production systems with artificial light for high resource use efficiency and quality produce.," *Acta Horticulturae*, vol. 1004, pp. 27-40, 2013.
- [18] K. Specht, "Urban Agriculture of the Future: An overview of sustainability aspects of food production in and on buildings," *Agriculture and Human Values*, vol. 31, no. 1, pp. 33-51, 2014.
- [19] A. Garg and R. Balodi, "Recent Trends in Agriculture: Vertical Farming and Organic Farming," *Advances in Plants & Agriculture Research*, vol. 1, no. 4, pp. 1-4, 2014.
- [20] Ç. Yılmaz, "Kentsel Tarımın Avrupa Birliği ve Türkiye'deki Geleceği," T.C. Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı Avrupa Birliği ve Dış İlişkiler Genel Müdürlüğü, Ankara, 2015.
- [21] T. Kozai, G. Niu and M. Takagaki, "Criticisms of PFALs and responses to them," in *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*, London, Academic Press, 2015, p. 23.
- [22] D. Avgoustaki ve G. Xydis, "Plant factories in the water-food-energy Nexus era: asystematic bibliographical review," *Food Security*, no. 12, pp. 253-268, 2020.



Kentsel Dönüşüm Sürecinde Binaların Mekânsal Veri Madenciliği Yöntemleri ile Tespiti

Detection of Buildings in the Urban Transformation Process with Spatial Data Mining Methods

Emre Turgut¹, Murat Taşyürek^{2*}, Nuh Azginoğlu³

¹ Kayseri Üniversitesi, Hesaplamalı Bilimler ve Mühendislik Anabilim Dalı, e.turgut@outlook.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1473-4630>

² Kayseri Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, murattasyurek@kayseri.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5623-8577>

³ Kayseri Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, nuhazginoglu@kayseri.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4074-7366>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 11 Şubat 2022
Revizyon 1 Nisan 2022
Kabul 12 Nisan 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

Kentsel Dönüşüm, Mekansal Veri Madenciliği, K-means, DBSCAN, OPTICS.

ÖZ

1950'lerden itibaren Türkiye'de sanayileşmenin hız kazanmasıyla birlikte özellikle büyük kentlerde ciddi bir işgücü talebi oluşmuş ve dolayısıyla hızlı bir iç göç hareketi ortaya çıkmıştır. Göç hareketinin sonucunda büyük şehirlerde düzensiz büyüme ve yerleşme faaliyeti başlamıştır. Düzensiz olan bu yerleşme neticesinde başta altyapı sorunları olmak üzere birçok sorun ortaya çıkmıştır. Bu sorunların çözümünde kentsel dönüşüm projeleri önemli bir yer edinmektedir. Kentsel dönüşüm projeleri alan ilanı ile başlayıp hak sahiplerinin tapu devrinin yapılmasıyla sonlanan bir süreçtir. Hak sahiplerinin maliki olduğu kadastro parsellerinin mevkiine göre parsellerine en yakın olan binadan kuraya girerek hangi dairede oturacağı belirlenir. Kendisine en yakın binanın belirlenme işlemi ise insan eliyle yapılmaktadır. Bu durum hem hız hem de doğruluk anlamında süreci olumsuz etkilemektedir. Verileri otomatik olarak sınıflandırma yeteneğinden dolayı, mekânsal veri madenciliği tabanlı kümeleme yöntemleri büyük veriler için oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında insan faktörü ile yapılan bina belirleme işlemi veri madenciliği tabanlı mekânsal kümeleme yöntemleri olan K-Means, DBSCAN ve OPTICS algoritmaları kullanılarak otomatize hale getirilmiştir. Yapılan deneysel değerlendirmeler sonucunda OPTICS kümeleme algoritması %90.69 oran ile en başarılı sonucu vermiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 February 2022
Received in revised form 1 April 2022
Accepted 12 April 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Urban Transformation, Spatial Data Mining, K-means, DBSCAN, OPTICS.

ABSTRACT

Since the 1950s, with the acceleration of industrialization in Turkey, a severe demand for labor has occurred, especially in big cities, and therefore a rapid internal migration movement has emerged. As a result of the migration movement, irregular growth and settlement activities started in big cities. As a result of this distinctive settlement, many problems have emerged, especially infrastructure problems. Urban transformation projects have an important place in the solution of these problems. Urban transformation projects are a process that starts with the announcement of the area and ends with the transfer of the title of the citizen. According to the location of the cadastral parcel that the city owns, the closest building to the parcel is drawn to determine which flat to live in. Selecting the nearest building to it is done by human hands. This situation negatively affects the process in terms of both speed and accuracy. Spatial data mining-based clustering is significant for big data because it can automatically classify data. Within the scope of this study, the building identification process with the human factor has been automated using data mining-based spatial clustering methods, K-Means, DBSCAN, and OPTICS algorithms. As a result of the experimental evaluations, the OPTICS clustering algorithm gave the most successful result with a rate of 90.69%.

Doi: 10.24012/dumf.1072110

* Sorumlu Yazar

Giriş

Ülkemizde, 1950'lerden itibaren sanayileşmenin de hız kazanmasının etkisiyle birlikte büyük kentlerde ciddi bir iş gücü talebi ortaya çıkmıştır. Bu durum kırsal kesimde maddi olanakların azlığı, eğitim ve öğretim ihtiyacı gibi etmenlerle birleşince büyük şehirlere göç cazip hale gelmiş, dolayısıyla da yoğun bir iç göç hareketi ortaya çıkmıştır [1]. 1950'den sonraki yıllarda büyük şehirlerin nüfus artışı doğal artışın yaklaşık üç katı oranında göç hareketlerine maruz kalmış, bu orandaki artış sonraki dönemde de devam etmiştir [2].

Büyük şehirler yıllar içerisindeki göç hareketlerinden dolayı düzensiz yerleşme ve çarpık yapılaşma sorunuyla yüz yüze kalmıştır. Şehir merkezlerinde niteliksiz yapılar çoğalmış ve bu alanlar çöküntü alanlar haline gelmiştir [3]. Bütün bu sebeplerden dolayı gecekondu tipi sağlıklı yapılar şehirlerin geneline yayılmıştır. Düzensiz olan bu yerleşme neticesinde başta altyapı sorunları olmak üzere birçok sorun ortaya çıkmıştır. Sağlam temeller üzerine inşa edilmemiş bu gibi bölgelerdeki yapıların en büyük sorunları afet riski ile karşı karşıya olmalarıdır. Yaşanan afetler de kentsel dönüşüm konusunun ortaya çıkmasında etkili olmuştur. 2000'li yıllardan itibaren ise gecekondu ve sağlıklı yapılaşmaya karşı politikalar üretilmiş, kentsel dönüşüm projeleri şehirleşme politikaları içinde en önemli yeri almayı başarmıştır [4]. Kentsel dönüşüm konusu dönüşümün henüz tamamlanmamış olduğu ülkemizin yanı sıra uluslararası kamuoyunun da her zaman gündeminde olan bir konudur [5]. Örnekle olarak Hollanda'nın Rotterdam ve ABD'nin New York City şehirleri uzun vadeli iklim, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık gündemlerini formüle etmek için döngüsel kentler, şehirlerin yeniden yapılandırılması gibi kavramları kullanmakta ve bunların uygulanması için şehir düzeyinde kesişen ortaklıklar kurmaktadır [6]. Ayrıca kentsel dönüşümünün dizaynının [7] ve sürdürülebilirliğinin [8] sağlanması, şehir formu ile dizaynının sağlanması [9] ve hızlı kentsel dönüşüm politikaları [10] konusunda çalışmalar bulunmaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde kentsel dönüşümün uluslararası düzeyde kabul görmüş ve sürekliliğinin sağlanması gereken bir süreç olduğu daha iyi anlaşılmaktadır.

Ülkemiz açısından bakıldığında ilgili kanunlar [11, 12, 13] kapsamında başlanan kentsel dönüşüm faaliyetleri, imar planı değişikliği ile başlayıp hak sahiplerinin mesken tapularının devri ile son bulan bir süreçtir. Hak sahiplerinin dairelerinin hangi binada yer alacağı, hak sahibi oldukları parselin binaya yakınlığına göre belirlenir. Manuel olarak gerçekleştirilen bu süreç hak sahibi sayısı, parsellerin büyüklükleri, parsellerin konumları ve hangi binaya daha yakın oldukları gibi etmenler sebebiyle çoğu zaman karmaşık bir hale gelmektedir.

Literatürde bu problemin tanımlandığı ve probleme çözüm aranan çalışmalara rastlanılmaktadır. Bu kapsamda, Şişman ve Kibaroğlu, konu olarak kentsel dönüşümün boyutlarını ve dünyada yapılan kentsel dönüşüm çalışmalarını ele almıştır [14]. Karabaş, kentsel dönüşümde gayrimenkul değerlendirme yaklaşımları ve sürecinden bahsetmiştir [15]. Doğan'ın çalışmasında ise kentsel dönüşümde halkın istekleri, düşünceleri ve eğilimleri dikkate alınmıştır [16]. Kandaloğlu, kentsel dönüşümde dağıtımın gelişigüzel

yapıldığını ve bununla ilgili bir matematiksel model geliştirilmesi gerekliliğinin üzerinde durmuştur [17].

İlgili problemde, binaların küme, kişilerin ise bu kümelerin elemanları olarak düşünülmesi durumunda ilgili problemin bir kümeleme problemi olduğu söylenebilir. Kümeleme problemlerine çözüm olarak mekânsal veri madenciliği tabanlı kümeleme algoritmaları gösterilebilir. Burada amaç kentsel dönüşüm projelerindeki hak sahiplerinin parselleri ve parsellere yakın olan binaları anlamlı kümeler haline getirmektir [18].

Kümeleme algoritmaları farklı problemler için çözüm olarak kullanılmıştır. Brimicombe [19] ve Anderson [20], trafik kaza yoğunluklarının belirlenmesi amacıyla coğrafik bilgi sistemleri üzerinde K-means algoritması kullanmışlardır. Gong ve Ark. cep telefonu GPS sinyallerini DBSCAN algoritması kullanarak kümeleyerek insanların durak noktalarını belirlemişlerdir [21]. Huang ve Ark. *Sina Weibo* kullanıcılarının verilerini DBSCAN yöntemi ile kümeleyerek kullanıcıya özel reklam önerisinde bulunmuşlardır [22]. Hotaite ve Ark. arıza izleme ve teşhisi için OPTICS kümeleme algoritmasını kullanmışlardır [23]. Wagner ve Ark. ise OPTICS yöntemini radar ölçümlerine uygulamanın olasılık ve sınırlar anlamında genel bir bakış sunmuşlardır [24]. Görüldüğü üzere veri madenciliği tabanlı kümeleme yöntemleri farklı alanlarda kullanılmış ve başarılı da olmuştur.

Literatür araştırmalarımızda gördüğümüz kadarıyla veri madenciliği, kentsel dönüşümde binaların belirlenmesi problemi özelinde daha önce kullanılmamıştır. Bu çalışma kapsamında kişilerin binalarının tespit edilmesi için klasik manuel yöntem yerine veri madenciliği tabanlı yöntemler önerilmiştir. K-means, DBSCAN ve OPTICS olmak üzere üç farklı mekânsal veri madenciliği yönteminin deneysel testleri gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerden OPTICS %90.69 başarı oranı ile en iyi sonucu vermiştir.

Materyal ve Metot

Veri Kümesi

Bu çalışma kapsamında Kayseri İli, Melikgazi İlçesi, Kazım Karabekir Mahallesi, kentsel dönüşüm alanı sınırları içerisinde kalan kadaströ parselleri ve kura çekim işlemi yapılacak olan binaların verisi kullanılmıştır. Şekil 1'de çalışma alanında görülen açık renkli alanlar kadaströ parsellerini, kırmızı renkli geometrik şekiller ise binaların dağılımını göstermektedir.

Veriler kullanılmadan önce ön işlem den geçirilmiştir. Bu kapsamda NetCAD programında içerisinde alandaki parseller ve binaların bulunduğu sayısal veri Coğrafi Bilgi Sistemi programlarına uygun olan shapefile (*.shp) dosya formatına dönüştürülmüştür. Elde edilen bu dosyalar Oracle (Express Edition 11G) veri tabanına aktarılmıştır [25]. Oracle veri tabanı sisteminde mekânsal geometrik fonksiyonlarından SDO_GEOM.SDO_AREA kullanılarak bütün kadaströ parsellerinin alanları hesaplanmıştır [26]. Bir diğer adımda SDO_GEOM.SDO_DISTANCE fonksiyonu kullanılarak her bir parselin bütün binalara olan mesafesi de hesaplanmıştır.



Şekil 1. Çalışma Alanı

DBSCAN (Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise) Algoritması

DBSCAN algoritması, nesnelerin başka nesnelere olan mesafelerinden yola çıkar ve bir bölgede bulunan nesnelere gruplayarak kümeleme işlemi yapar [27]. DBSCAN algoritması *MinPts* ve *eps* parametrelerine ihtiyaç duymaktadır. Bu parametrelerden *eps*, veri nesnesinin komşularını belirlemek için gerekli olan yakınlık mesafesini, *MinPts* ise bölgenin yoğun sayılabilmesi için gereken *eps* komşuluğundaki en az komşu sayısını ifade etmektedir.

DBSCAN algoritması öncelikle veri uzayından merkez olarak kabul edilen rastgele bir nokta seçer. Alınan yarıçap içerisinde kalan noktaların sayısı minimum nokta değerine eşit veya büyük ise bu bölge yoğun kabul edilir. Yoğun bölgenin merkezindeki bu nokta çekirdek nokta olarak sınıflandırılır. Merkez kabul edilen her nokta için aynı işlem tekrar eder. Eğer merkez kabul edilen noktalardan herhangi birisi çekirdek nokta koşulunu sağlamıyorsa ve bu nokta çekirdek noktanın sınırları içerisinde ise bu nokta kümenin sınır noktasıdır. Çekirdek noktalar sabittir. Bu işlem her çekirdek nokta için tekrar eden bir işlemdir ve incelenen noktalardan hiçbirisi çekirdek nokta koşulunu sağlamadığı zaman kümenin sınırları belirlenmiş olur. Ardından algoritma yeni bir nokta seçerek aynı işlemleri tekrar eder. Eğer başlangıç noktasını merkez kabul edip yarıçap içerisinde kalan noktalar, belirlenen minimum nokta sayısını karşılamıyorsa bu nokta gürültü (noise point) olarak tanımlanır.

K-means Algoritması

K-means, verileri yoğunluk tabanlı sınıflandıran bir kümeleme algoritmasıdır [28]. Sınıflandırma işlemini, verileri en yakında ve benzer oldukları küme merkezleri etrafına yerleştirerek, en yakın ve benzer oldukları kümelere göre yapmaktadır. Öklid Mesafesinin temel alındığı K-means algoritmasında sabit bir küme sayısına ihtiyaç duyulmaktadır. *K* sayısı küme sayısını, dolayısıyla da küme elemanlarının birbirine olan yakınlıklarına göre oluşturulacak grup sayısını

ifade etmektedir. K-means, bilimsel ve endüstriyel alanda sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisidir.

OPTICS (Ordering Points to Identify the Clustering Structure) Algoritması

OPTICS algoritması DBSCAN algoritmasının bir uzantısıdır [29]. DBSCAN algoritmasının kullandığı parametrelere olan bağılılığı azaltmak için sabit bir *MinPts* değerine göre her noktanın *eps* değerini bulur ve bunları bir grafik üzerine yansıtarak kullanıcının istediği herhangi bir *eps* değerine göre küme bulmasına olanak sağlar. OPTICS, sadece *eps* değeri ile çalıştığı için DBSCAN algoritmasına göre daha bağımsız sonuçlar üretebilir. Farklı *eps* değerine sahip kümelenmeleri tespit etmek için veri tabanını tekrar tekrar taramaz, tek taramada elde ettiği grafik tüm analiz için geçerli olur. OPTICS, veri kümesini insan gözüyle ayırt edilebilecek şekiller haline dönüştürür. OPTICS algoritması önce rastgele bir nokta seçer. Seçilen noktanın *eps* komşuluğundaki en yakın komşusu ile seçilen nokta arasındaki uzaklığı bir çubuk grafiğinde sütun olarak gösterir. Aynı işlemi uzaklıklarına göre *eps* komşuluğundaki tüm nesnelere için uygular. Nokta kalmayınca yeniden bir rastgele nokta seçerek noktanın komşuları için aynı işleme devam eder.

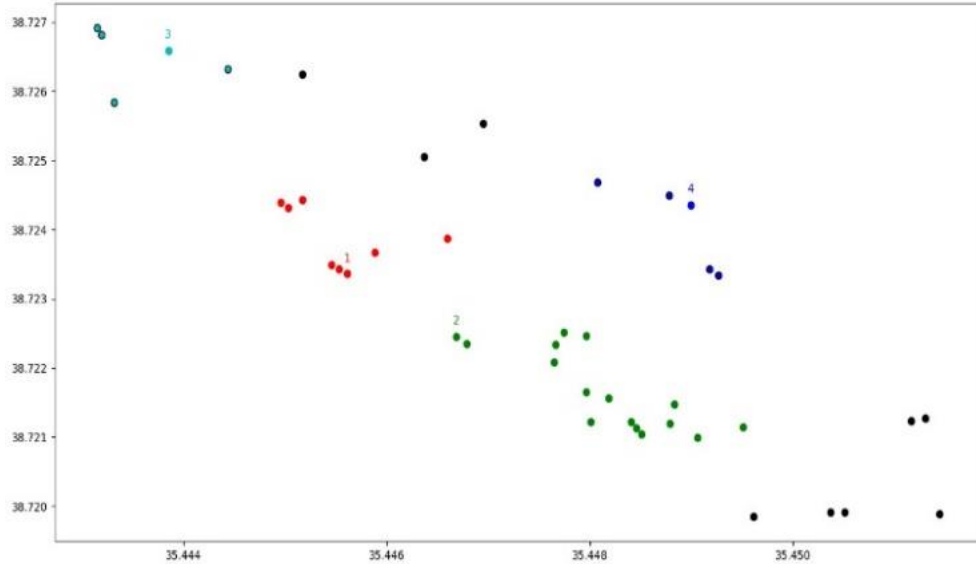
Problem ve Çözümler

Problem Tanımı

Kentsel dönüşüm, atıl vaziyette olan, köhneleşmiş, afet riskleri karşısında tehlike arz eden, altyapı bakımından yetersiz, yoğun, çarpık ve imara aykırı yapılaşmış yapıların imar planına uygun hale getirilmesi olarak tanımlanabilir [30, 31, 32]. Bu çalışma kapsamında Kayseri İli, Melikgazi İlçesi, Kazım Karabekir Mahallesi, kentsel dönüşüm bölgesi proje alanı olarak seçilmiştir. Bu çalışma alanındaki kentsel dönüşüm bloklarında 105m², 115m², 135m², 155m² boyutlarında dört tip daire bulunmaktadır. Kişiler anlaşma neticesinde maliki olduğu kadastro parseli esas alınarak yapılan hesaplama neticesinde daire tiplerinden birini seçerek anlaşmasını tamamlamaktadır.

Anlaşmasını tamamlayanlar için dairelerin hangi blok içerisinde olacağı, kadastro parsellerinin konumuna göre en yakın olan, seçimi yapılan daire tipinin içerisinde bulunduğu bloktan kura çekimi yapılarak belirlenmektedir. Bu çalışmada odaklanılan problem, kişilerin nereden kuraya girebileceğinin kümeleme yöntemleri kullanılarak belirlenmesi ve böylece bu aşamada insan faktörünün ortadan kaldırılmasıdır. Hem problemin karakteristiği gereği hem de veri büyüklüğü dikkate alındığında, veri madenciliği temelli küme analizinin mevcut problem için etkin ve uygulanabilir bir çözüm olduğu görülmüştür.

Kümeleme analizi, veri tabanlarındaki verileri gruplayan veya kümeler halinde, özellik bakımından birbirine benzeyen nesnelerin bir araya gelmesini sağlayan bir veri madenciliği tekniğidir. Kümeleme algoritmalarının verileri otomatik olarak sınıflandırma yeteneğinden dolayı büyük veri için önemli bir anahtar olduğu ifade edilmektedir. Bu çalışma kapsamında kümeleme yeteneklerinden ve problem özelinde uygulanabilir olduklarından dolayı DBSCAN, K-means ve OPTICS algoritmaları kullanılmıştır.



Şekil 2. DBSCAN ile Kümeleme Sonuçları

Klasik Yöntem ile Bina Tespit İşlemi

Klasik yöntemde kişilerin dairelerini seçme işlemleri kura usulüne göre gerçekleşir. Kişi, parselin konumu göz önüne alınarak seçtiği daire tipine göre en yakındaki binadan kuraya girmeye hak kazanır. Veri sayısının artması karmaşıklığa yol açmakta olup bu yöntemde insani faktörler devreye girmekte ve her zaman en adilane çözüme ulaşılmayabilmektedir.

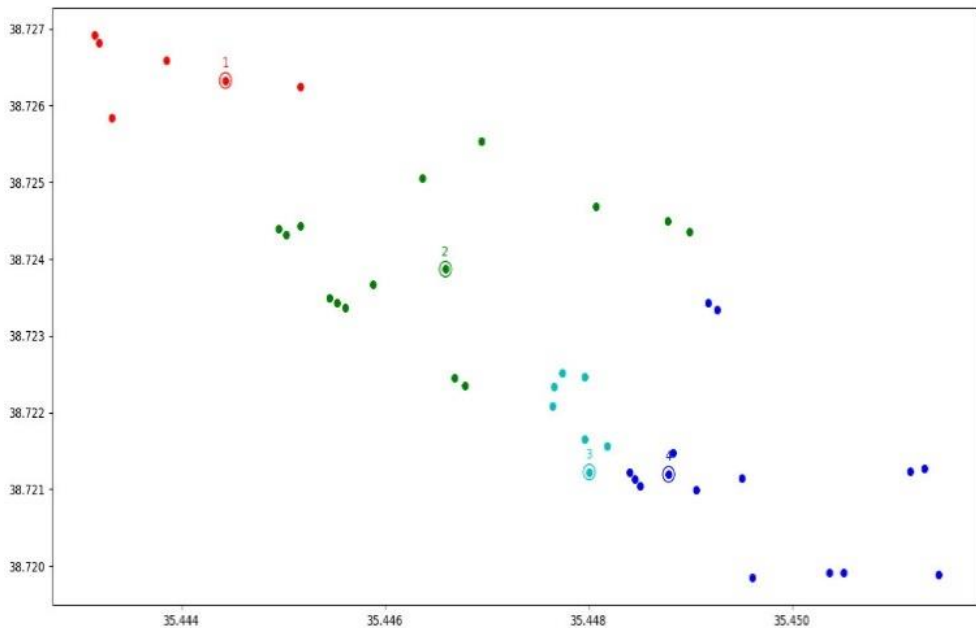
DBSCAN Yöntemi ile Bina Tespit İşlemi

Çalışma kapsamında kullanılan yöntemlerden bir tanesi DBSCAN olmuştur. Algoritmanın parametrelerinden *MinPts* bir kümede bulunacak eleman sayısını ifade etmekteydi. Bu problem özelinde *MinPts* paylaştırılacak daire sayısı olarak belirlenmiştir. Veri kümesi incelendiğinde dağıtım işleminde her bir kümede en az 6 adet daire

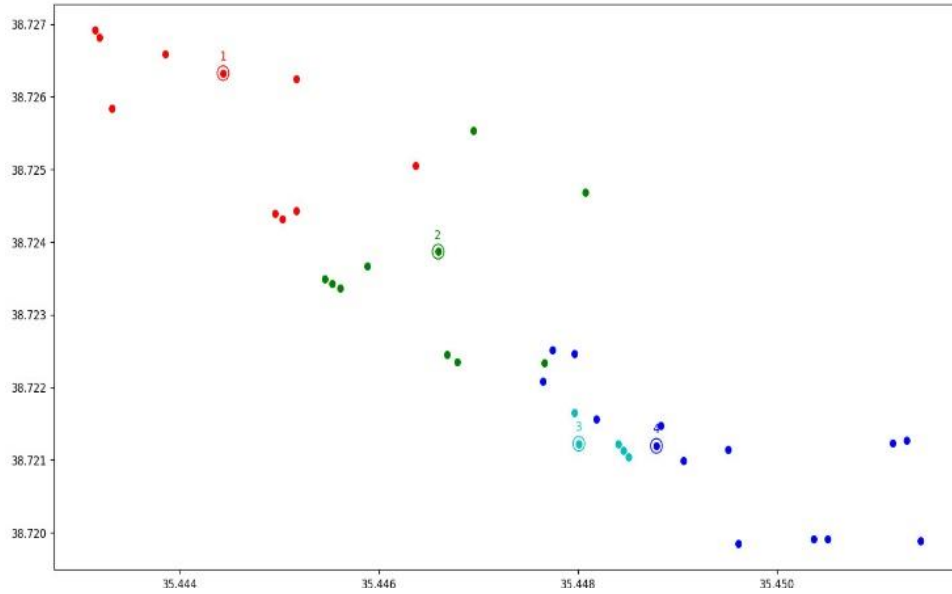
olmasının uygun olacağı görülmüş ve *MinPts* değeri 6 olarak ayarlanmıştır. Bir bina ile bir parsel arasındaki en uzak mesafe 600 metre olduğundan dolayı DBSCAN algoritmasında parsel *eps* değeri 0.6 km belirlenmiştir. Şekil 2’de DBSCAN algoritması ile yapılan kümeleme sonucu gösterilmektedir. Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4’te X-ekseni çalışma alanının boylam bilgisini ifade ederken Y-ekseni ise enlem bilgisini sunmaktadır. Şekil 2’de dört farklı renkteki küme merkezleri ve kümeleme sonucu parsellerin hangi binadan kuraya girebilecekleri belirlenmiş fakat kümeleme işlemine dâhil olamayan parseller siyah noktalarla (noise point) gösterilmiştir.

K-means Yöntemi ile Bina Tespit İşlemi

K-means algoritmasında küme başlangıç noktası ve küme sayısı çok önemlidir. Üzerinde çalıştığımız problem özelinde küme merkezi olarak binanın ağırlık merkezi, *K* olarak isimlendirilen küme sayısı olarak da toplam bina sayısı



Şekil 3 K-means ile Kümeleme Sonuçları



Şekil 4 OPTICS ile Kümeleme Sonuçları

ayarlanmıştır. Şekil 3'te K-means algoritması kullanılarak elde edilmiş olan kümeleme sonuçları verilmiştir.

OPTICS Yöntemi ile Bina Tespit İşlemi

OPTICS algoritması geliştirilmiş bir DBSCAN algoritması olduğundan dolayı OPTICS algoritmasında DBSCAN algoritmasında kullanılan metrik değerlerin aynı kullanılmıştır. OPTICS kümeleme algoritmasının kullanıldığı yöntemde verilerin hangi kümeye dâhil oldukları ve kümeleme sonucu Şekil 4'te sunulmuştur.

DeneySEL Değerlendirme ve Tartışma

Dağıtım kümesi olarak kullanılan veri kümesindeki 105m², 115m², 135m², 155m²'lik dairelerin bulunduğu dört bina merkez olarak seçilmiştir. Kümeleme işlemi sonrasında açıkta kalan parsel sayıları Grafik-1'de görsel olarak, Tablo-1'de ise sayısal verilmiştir. DBSCAN algoritması kura aşamasına geçmeden önce binalardan kuraya girecek parsel sahiplerinin en yakındaki binaya yerleştirmede sorun

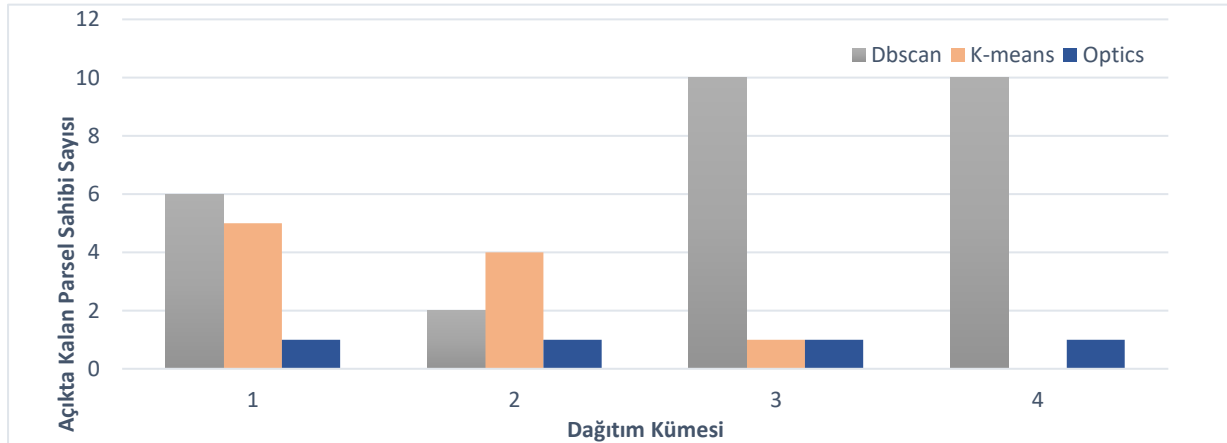
yaşamış ve tabloda görüldüğü üzere toplamda 28 parsel sahibini küme dışında bırakarak, kümeleme işlemi hata payı en çok olan algoritma olmuştur. K-means algoritması ile yapılan kümeleme işlemi doğruluk oranı DBSCAN algoritmasına göre daha yüksek olmakla birlikte toplamda 10 parsel sahibini küme dışı bırakmıştır.

Tablo 1 K-means ile Kümeleme Sonuçları

	DBSCAN	K-means	OPTICS
Kümeye Dahil Olan PSS*	15	33	39
Küme Dışında Kalan PSS	28	10	4
Toplam PSS	43	43	43
Başarı Oranı	%34.88	%76.74	%90.69

*: Parsel Sahibi Sayısı

OPTICS algoritması ile yapılan kümeleme işlemi ise her veri kümesinde 1, toplamda 4 parsel sahibini küme dışında bırakarak diğer algoritmalarla göre en doğru sonucu veren algoritma olmuştur. Bu durumda algoritmaların başarı oranları DBSCAN için %34.88, K-means için %76.74 ve son olarak OPTICS için %90.69 olarak tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında herhangi bir kümeye dâhil olmayan parsel sahibi sayısının minimum olması ve böylelikle kura işleminin en



Grafik 1 Kümeleme İşlemi Sonrasında Açıkta Kalan Parsel Sayıları

doğru şekilde tamamlanması amaçlanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar daha önce bu problem özelinde kullanılmamış olan mekânsal veri madenciliği tabanlı kümeleme algoritmalarının problem çözümünde kullanılabileceğini göstermiştir.

Sonuç

Bu çalışma kapsamında kentsel dönüşümde kişilerin evlerinin dağıtılacağı binaların belirlenmesi problemi için mekânsal veri madenciliği tabanlı kümeleme yöntemleri önerilmiştir. Böylelikle hem bu aşamadaki insan faktörünün ortadan kaldırılması hem de zaman tasarrufu yapılması amaçlanmıştır. K-means, DBSCAN ve OPTICS olmak üzere üç farklı algoritmanın kullanıldığı çalışmada, OPTICS algoritması kümeleme işlemini ideale en yakın olacak biçimde gerçekleştirmiştir. Bu yöntem kişilerin kura çekilişi yapılacak binalara yerleştirilmesinde, her veri kümesinde sadece 1 parsel sahibini dışarda bırakarak en düşük hata payı ile sonuca ulaşılmasını sağlamıştır.

Elde edilen sonuçlar mekânsal veri madenciliği tabanlı yöntemlerin kentsel dönüşüm sürecinde karşılaşılan farklı problemlerde kullanılabileceğini göstermiştir.

Gelecek çalışmalarda bina tespiti probleminde açıkta parsel sahibi kalmaması için kullanılan yöntemlerin mesafe parametresine ek olarak farklı parametreler kullanılarak iyileştirilmesi ve yeni yöntemlerin geliştirilmesi planlanmakta olup aynı zamanda tespit ettiğimiz, kentsel dönüşüm sürecinde ortaya çıkan farklı problemlere veri madenciliği yöntemleriyle çözüm aranacaktır.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan verilerin temini için Melikgazi Belediyesi Kentsel Dönüşüm Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Bülbül, S., & Kose, A. (2010). Türkiye'de bölgelerarası iç göç hareketlerinin çok boyutlu ölçekleme yöntemi ile incelenmesi. İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 39(1), 75-94.
- [2] Osmay, S. (1998). 1923'ten Bugüne Kent Merkezlerinin Dönüşümü. 75 Yılda Değişen Kent ve Mimarlık, 139-154.
- [3] Senan, N. Z. (2016). Türkiyede kentsel yenileme projeleri, tarihi sit alanları ve kentsel yenileme ilişkisi üzerine bir değerlendirme: Okmeydanı tarihi sit alanları koruma amaçlı ve etkileşim geçiş sahası nazım imar planı incelemesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [4] Acar, A. (2008). Türkiye'de kentsel dönüşüm projeleri. Yerel Siyaset Dergisi, Yıl, 3, 13-15.
- [5] Hölscher, K., & Frantzeskaki, N. (2021). Perspectives on urban transformation research: transformations in, of, and by cities. Urban Transformations, 3(1), 1-14.
- [6] Hölscher, K., Frantzeskaki, N., McPhearson, T., & Loorbach, D. (2019). Tales of transforming cities: Transformative climate governance capacities in New York City, US and Rotterdam, Netherlands. Journal of environmental management, 231, 843-857.

- [7] Inam, A. (2013). Designing urban transformation. Routledge.
- [8] McCormick, K., Anderberg, S., Coenen, L., & Neij, L. (2013). Advancing sustainable urban transformation. Journal of cleaner production, 50, 1-11.
- [9] Bosselmann, P. (2012). Urban transformation: Understanding city form and design. Island Press.
- [10] Grandin, J., Haarstad, H., Kjærås, K., & Bouzarovski, S. (2018). The politics of rapid urban transformation. Current Opinion in Environmental Sustainability, 31, 16-22.
- [11] Abacıoğlu, A., & Abacıoğlu, M. (2014). Kentsel dönüşüm kanunu ile ilgili mevzuat. Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun), Seçkin Yayıncılık.
- [12] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 16.05.2012 tarih ve 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun
- [13] 03.07.2005 tarih ve 5393 sayılı Belediye Kanunu'nun 73. Maddesi.
- [14] Şisman, A., & Kibaroglu, D. (2009). Dünyada Ve Türkiye'de Kentsel Dönüşüm Uygulamaları. Seçkin Yayıncılık.
- [15] Karabaş, F. (2010). Kentsel dönüşüm uygulamalarında gayrimenkul değerlendirme yaklaşımının Bayrampaşa kentsel dönüşüm projesi kapsamında irdelenmesi (Doctoral dissertation, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [16] Doğan, H. H. (2015). Yerel yönetimlerin kentsel dönüşüm uygulamaları sürecine halkın katılımı. HİTİT Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 8(2), 505-544.
- [17] Kandaloğlu, N. (2013). Kentsel Dönüşüm ve Bir Dağıtım Modeli Önerisi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [18] Valarmathy, N., & Krishnaveni, S. (2020). A novel method to enhance the performance evaluation of DBSCAN clustering algorithm using different distinguished metrics. Materials Today: Proceedings.
- [19] Brimicombe, A. J. (2007). A dual approach to cluster discovery in point event data sets. Computers, environment and urban systems, 31(1), 4-18.
- [20] Anderson, T. K. (2009). Kernel density estimation and K-means clustering to profile road accident hotspots. Accident Analysis & Prevention, 41(3), 359-364.
- [21] Gong, L., Sato, H., Yamamoto, T., Miwa, T., & Morikawa, T. (2015). Identification of activity stop locations in GPS trajectories by density-based clustering method combined with support vector machines. Journal of Modern Transportation, 23(3), 202-213.
- [22] Huang, Y., Huang, W., Xiang, X., & Yan, J. (2021). An empirical study of personalized advertising recommendation based on DBSCAN clustering of sina

- weibo user-generated content. *Procedia Computer Science*, 183, 303-310.
- [23] Hotait, H., Chiementin, X., Mouchaweh, M. S., & Rasolofondraibe, L. (2021). Monitoring of Ball Bearing Based on Improved Real-Time OPTICS Clustering. *Journal of Signal Processing Systems*, 93(2), 221-237.
- [24] Wagner, T., Feger, R., & Stelzer, A. (2018, September). Modifications of the OPTICS Clustering Algorithm for Short-Range Radar Tracking Applications. In 2018 15th European Radar Conference (EuRAD) (pp. 91-94). IEEE.
- [25] Kranjčević, B. (2014). Oracle Database Express Edition 11g (Doctoral dissertation, University of Zagreb. Faculty of Organization and Informatics Varaždin. Department of Theoretical and Applied Foundations of Information Sciences).
- [26] Malerba, D., Ceci, M., & Appice, A. (2005, October). Mining model trees from spatial data. In European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery (pp. 169-180). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [27] Ester, M., Kriegel, H. P., Sander, J., & Xu, X. (1996, August). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In *kdd* (Vol. 96, No. 34, pp. 226-231).
- [28] MacQueen, J. (1967, June). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability* (Vol. 1, No. 14, pp. 281-297).
- [29] Dassun, J. C., Reyes, A., Yokoyama, H., & Dolendo, M. (2015). Ordering points to identify the clustering structure algorithm in fingerprint-based age classification. *Virtutis Incunabula*, 2(1), 17-27.
- [30] Ülger, E. (2010). Türkiye’de Arsa Düzenlemeleri ve Kentsel Dönüşüm, 372 s. Nobel Yayınları.
- [31] Ataöv, A., & Osmay, S. (2007). Türkiye’de kentsel dönüşüme yöntemsel bir yaklaşım.
- [32] Roberts, P. ve Sykes, H. (2008). The Evolution, Definition and Purpose of the Urban Regeneration, *Urban Regeneration a Handbook*, Der: Peter Roberts ve Hugh Sykes, SAGE Publications, London, s. 9-37



Ateş Böceği Algoritması ile Yağlı Tip Transformatörün Ağırlık Optimizasyonu

The Weight Optimisation of Oil-Type Transformer with Firefly Algorithm

Mizgin AKDAĞ^{1*}, Mehmet ÇELEBİ²

^{1*} Harran Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mizginkayaa@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6403-7492>

² Uşak Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, mehmet.celebi@usak.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1243-9403>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 17 Şubat 2022
Revizyon 28 Nisan 2022
Kabul 29 Nisan 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

*Ateş Böceği Algoritması,
Optimizasyon, Simülasyon,
Transformatör*

ÖZ

Transformatörler elektrik sistemlerinin en önemli birleşenlerinden biridir. Daha çok iletimde kullanılan bu sabit makineler, maliyetli elemanlardır. Maliyetli olmasının en büyük nedenlerinden bir tanesi transformatörün ağırlığıdır. Bu çalışmada transformatör tiplerinden biri olan yağlı tip transformatörün, Ateş böceği algoritması ile ağırlık optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmada üç faz, 50 Hz, 50 kVA, 34.5/0.4 kV ve üçgen-yıldız yağlı tip transformatör simüle edilmiştir. Bu simülasyon gerçekleştirilirken transformatörün akım yoğunluğu (s) ve demir kesiti uygunluk faktörü (C) optimize edilerek transformatörün ağırlığı ve ağırlığa bağlı olarak maliyeti optimal seviyeye düşürülmesi amaçlanmıştır. Simülasyonlar 200 kere MATLAB ortamında çalıştırılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre kullanılan parametreler optimal seviyede tutularak ağırlıkta yaklaşık olarak %11'lik bir azalma gerçekleştirilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 February 2022
Received in revised form 28 April 2022
Accepted 29 April 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

*Firefly Algorithm , Optimization,
Simulation, Transformer*

ABSTRACT

Transformers are the one of the most important components of electrical systems. These fixed machines, which are mostly used in transmission , are costly element. The biggest reason why it is costly is the weight of the transformer. In this study, the oil type transformer, which is one of the transformer types, is optimized with the Firefly algorithm. In this paper, a three-phase, 50 Hz, 50 kVA, 34.5/0.4 kV and triangle-star oil type transformer is simulation. While carrying out this simulation, it is aimed to reduce the cost to the optimal level depending on the weight and weight of the transformer by optimizing the transformer's current density(s) and iron section compatibility factor (C). The simulations are tried 200 times in MATLAB environment and the results were analyzed. According to the analysis results obtained, the parameters used are kept optimal level and approximately %11 by weight a decrease has occurred.

Doi: 10.24012/dumf.1075008

* Sorumlu Yazar

Giriş

Gelişen teknolojiyle sorunların hızlı bir şekilde çözüme ulaştırılması ve en iyi çözümle sonuçlandırılması büyük bir önem taşımaktadır. Bu yüzden problemlerin en iyi çözümünü bulmak için optimizasyon işlemleri gerçekleştirilir. Optimizasyon, verilen amaç veya amaçlar için belirli kısıtlamaların sağlanarak en uygun çözümün elde edilme sürecidir. Optimizasyon mühendislik alanında ve birçok alanda problemlerin çözümünde karar verme sürecini hızlandırdığı gibi doğru ve en iyi sonuca ulaşmayı sağlar. Bu doğrultuda bilim insanları tarafından birçok optimizasyon algoritmaları, teknikleri ve yöntemleri geliştirilmiştir.

Optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan klasik yöntemler, gerçek hayat problemlerini çözmede yetersiz kaldığı, çözüm sürelerinin ve çözüm karmaşıklığının problem boyutuyla orantılı olarak çok artması, sezgisel araştırma yöntemlerinin gelişmesine yol açmıştır [1]. Bunun neticesi olarak ta sezgisel optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir. Sezgisel algoritmalar, genellikle doğadan esinlenerek oluşturulan yöntemlerdir. Bu sezgisel algoritmalar; fiziksel süreç ve yasalardan esinlenmiş algoritmalar olarak; yer çekimi arama algoritması (Gravity Search Algorithm)(GSA), benzetilmiş tavlama algoritması (Simulated Annealing)(SA), doğal olaylardan esinlenmiş algoritmalar olarak; kara delik optimizasyon algoritması, su döngüsü optimizasyon algoritması, canlılardan esinlenmiş algoritmalar olarak; yapay arı kolonisi algoritması (Artificial Bee Colony) (ABC), ateş böceği algoritması (Firefly Algorithm)(FA) gibi algoritmalar örnek verilebilir. Bunlarla beraber "En iyi olan hayatta kalır" felsefesine dayalı [1] genetik algoritma (Genetic Algorithm)(GA), incelenmiş noktaların tabu olarak sayıldığı ve tabu olan noktayı tekrar incelenmeyeceğini baz alan tabu arama algoritması da sezgisel algoritmaların bir diğer örnekleridir.

Literatüre bakıldığında, farklı algoritmalar ile yapılan birçok çalışma mevcuttur. Çalışmalar incelendiğinde elektrik makineleri alanında aşağıdaki optimizasyon teknikleri uygulanmıştır.

Görünür gücü 1.5 kVA olan bir kuru tip transformatörün demir kesiti değişkeni azaltılarak transformatör ağırlığı %20' ye yakın oranda Genetik Algoritma ile azaltılmıştır [2]. Bu uygulamada akım yoğunluğu ve demir kesiti uygunluğu sınır değerlere bağlı olarak GA optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve parametre sayısı artırılarak daha gerçekçi bir optimizasyon gerçekleştirilebileceği ön görülmüştür.

Genetik algoritma ile konsantre sargılı sabit mıknatıslı senkron motorun tasarım optimizasyonu amaçlanmıştır [3]. Senkron motorun temel parametreleri göz önünde bulundurularak tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler; rotor dış çapı (D_{rs}), mıknatıs kalınlığı (l_m), hava aralığı (δ), oluk kama yüksekliği (h_{sw}), stator dış genişliği (b_{ts}), stator dış çapı (D_o), oluk yüksekliği (h_{ss}), oluk açıklığının oluk genişliğine oranı (k_{open}), yarım kutup açısı (α) ve motor uzunluğu (L_{ts}) olarak seçilmiştir. Çalışmada popülasyon sayısı, iterasyon sayısı, çaprazlama oranı ve mutasyon oranı sırasıyla 25, 50, 0.8 ve 0.1 olarak

belirlenmiştir. Sonuç olarak, bulunan değerlerin sabit mıknatıslı senkron motorun tasarım optimizasyonu için denenen yaklaşımın tatmin edici olduğu kanısına varılmıştır.

Asenkron motorlarda rotor oluşunun farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak performansa etkileri incelenmiştir [4]. Çalışmada rotor oluk ölçüleri Ardışık lineer olmayan Programlama (SNP- Sequential Nonlinear Programming), Genetik Algoritma ve Ardışık Karışık lineer olmayan Programlama (SMINP- Sequential Mixed Nonlinear Programming) yöntemleri ile bulunmuş ve motor performansa etkileri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak kullanılan üç farklı yöntemden de başlangıç değerlerine göre daha yüksek verim elde edildiği görülmüştür. Akı yoğunluğu ve kalkış performansı incelendiğinde GA optimizasyon sonuçlarının en optimum değerlerde olduğu görülmüş ve en verimli motor geometrisi GA kullanıldığında elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Kuru tip bir transformatörün verimini maksimize etmek amacıyla ateş böceği algoritması ile transformatörün tasarımı gerçekleştirilmiştir [5]. Uygulama için 100 KVA görünür güce sahip bir transformatörün demir kesiti uygunluğu ve akım yoğunluğu değerleri değiştirilerek maksimum verime ulaşılmaya çalışılmıştır ve sonuç olarak verim değeri %97 olarak saptanmıştır.

Tekrardan başka bir çalışmada kuru tip transformatörün akım yoğunluğu ve demir kesiti uygunluğu parametreleri kullanılarak tabu arama algoritması ile transformatörün optimizasyonu gerçekleştirilmiştir [6]. Bu çalışmada demir kesiti uygunluk faktörü, sargılardaki akım yoğunluğu, pencere genişliği, primer ve sekonder; sargı kesitleri, sargı uzunlukları ve sargı ağırlıkları, demir çekirdek çapı, transformatör bacak ve boyunduruk ağırlığı, transformatörün toplam ağırlığı ve verim gibi parametrelerin klasik yöntemler ile ve tabu araması sonucu elde edilen değerleri karşılaştırılmıştır. Tabu arama algoritması sonucu elde edilen değerlerde daha az nüve ve demir kaybı olduğunu buna bağlı olarak enerji ve maliyet tasarruf sağladıkları gözlemlenmiştir.

Diğer bir çalışmada ise transformatörün farklı yüklenme durumuna göre transformatör veriminin maksimum olduğu çalışma noktasının bulunması yerçekimsel arama algoritması (GSA) ile sağlanmıştır [7]. Çalışmada yağlı ve kuru tip transformatörlerin akım yoğunluğu ve demir kesiti uygunluk aralıkları temel alınarak klasik yöntemle bulunan değerler ve yerçekimsel arama algoritması sonucu elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak; yerçekimsel arama algoritmasının bulmuş olduğu parametreler ile verim optimizasyonu için uygulanabilir ve alternatif bir yöntem olduğu saptanmıştır.

Literatürde yağlı tip transformatörlerde kullanılan yağ optimizasyon çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmanın amacı madeni yağın performansını iyileştirmektir [8]. Çalışmada farklı yağlar harmanlanarak bir karışım hazırlanmıştır. Optimum karışımın sıvı yalıtım seçimi gri ilişkisel analiz yöntemi (Grey Relation Analysis)(GRA) ile gerçekleştirilmiştir. Transformatörde daha iyi çıkış değerleri elde etmek için kullanılan yağ numunelerinin (ayçiçeği yağı, palmye yağı, kolza tohumu yağı, zeytin

yağı, doğal ester yağları) optimal karıştırma seviyelerini belirlemek için taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmış ve optimal karışım oranı elde edilmiştir.

Yeni sezgisel bir yaklaşım olan ateş böceği algoritması ile yağlı tip transformatörün hacmi optimize edilip en kısa zamanda optimum değere ulaşılması amaçlanmıştır [9]. Transformatörün yükseklik, yüzey alan genişliği ve uzunluğu, derinlik gibi parametreler GA ve ateş böceği algoritmaları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda FA sonuçları GA sonuçlarına göre daha iyi olduğu ve ateş böceği algoritmasının daha hızlı sonuca ulaştığı görülmüştür.

Diğer bir çalışmada ise transformatörün verimini en üst seviyeye çıkarmak için üç farklı meta sezgisel algoritma kullanılmıştır [10]. Bu algoritmalar parçacık sürü algoritması, benzetimli tavlama ve ağaç tohum algoritmasıdır. Çalışmada üç fazlı 100 kVA'lık kuru tip transformatör kullanılmış akım yoğunluğu ve demir kesit uygunluk faktörü optimize edilerek maksimum verime ulaşılmaya çalışılmıştır. Her algoritma 30 defa çalıştırılmış ve iterasyon sayısı 50 olarak belirlenmiştir. Benzetimli tavlama algoritmasının 40. iterasyonda en iyi değer ulaştığı ve bu değer 0.981 olduğu, parçacık sürü algoritmasının 50. iterasyonda en iyi değere ulaştığının ve bu değer 0.9838 olduğu, ağaç tohum algoritmasının ise en iyi değere 30. iterasyonda ulaştığı ve bu değer 0.98439 olduğu gözlemlenmiştir ve ağaç tohumu algoritmasının bu üç algoritma arasında maksimum verimliliği bulmada hem en hızlı hem de en iyisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Dağıtım transformatörlerin tasarımında farklı algoritmaların kullanılıp kıyaslandığı çalışmalar mevcuttur[11]. Çalışmada yaklaşık 20 tane güncel meta sezgisel algoritma incelenmiş bunlar arasında en iyi performans gösteren yapay arı kolonisi, geri-izleme arama optimizasyonu, rekabetçi-uyarmalı diferansiyel gelişim, guguk kuşu arama ve çiçek tozlaşma algoritmaları çalışmalarına yer verilmiştir. Çalışmada amaç fonksiyonu transformatörün ana malzeme maliyetinin minimize edilmesi kısıt ise boşa kayıp kısıtı olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, üç farklı güce sahip transformatörün performans testleri sonucu rekabetçi-uyarmalı diferansiyel gelişim algoritmasının 30 saniyeden kısa bir sürede %99.9'dan daha fazla doğruluk ve hassasiyetle sonuç ürettiği kanıtlanmıştır[11].

Bazı çalışmalarda hibrit algoritma şeklinde tanımlanan, iki farklı algoritmanın beraber kullanılması, algoritmalar kullanılmaktır. Karınca kolonisi algoritması ve ateş böceği algoritması kullanılarak yağlı tip transformatörün tank maliyeti optimize edilmeye çalışılmıştır [12]. Visual studio platformunda transformatör tank ara yüzü oluşturulmuş ve duvar sac kalınlığı, donatı(transformatör tankını oluşturan malzeme) kalınlığı, taban plakası kalınlığı, taban plakası dayanımı, taban plakası sehimi, taşıma kuvvetleri, duvar plakası kalınlığı, donatı yüksekliği, donatı üst katman genişliği, dayanım momentleri, donatı kesiti ve donatı ağırlığı gibi parametreler optimize edilerek sonuç olarak elde edilen değerlerden trafo tankında kullanılacak malzemelerden %5'ten %15'e kadar tasarruf elde edildiği gözlemlenmiştir.

Çalışmalar incelendiğinde bazı çalışmaların ise problemi optimize eden algoritmaların iyileştirilmesine yönelik olduğu görülmektedir. Çalışmalar aşağıda bahsedildiği gibidir.

Çalışmada havada meydana gelen anlık değişimlerin ateş böceği algoritması tarafından göz önünde bulundurulması ateş böceği algoritması daha iyileştirilmeye çalışılmıştır [13]. Işık emilim katsayısının algoritmada sabit bir sayı olarak kullanılması algoritmanın başarısı açısından yeterli olmadığı düşünülüp havanın sisli, nemli gibi durumlarında değişken ışık emilim katsayısı kullanılması önerilmiş ve bu geliştirilmiş algoritma iris, car, zoo üç veri kümesini sınıflama amacıyla kullanılmıştır.

Kaos teorisi, her iterasyon sonunda en iyi ışık yayan ateş böceğine uygulanarak kaotik ateş böceği optimizasyon algoritması (KAOA) geliştirilmiştir [14]. KAOA, termik güç santralleri içerisinde olan kayıplı bir güç sistemindeki çevresel ekonomik yük dağıtım problemlerinin çözüm optimizasyonunda kullanılmıştır. Klasik ateş böceği algoritması ekonomik yük dağıtım problemlerinin çözümünü gerçekleştirmediği kısımlarda, KAOA çözüme daha kolay ulaştığı saptanmıştır.

Literatürdeki araştırmaların çoğunun transformatörlerin genel olarak ağırlık ve maliyetini düşürmeye yönelik olduğu ve bu amaç doğrultusunda farklı tasarımlar gerçekleştirildiği ve farklı sezgisel algoritmalar kullanıldığı görülmüştür. Çalışmaların çoğunda genellikle farklı optimizasyon yöntemleri kullanılmış olsa da genel olarak optimizasyon parametreleri akım yoğunluğu ve demir kesit uygunluk faktörü olarak seçilmiştir [2], [5], [6], [7], [10], [15], [16], [17]. Bazı çalışmalarda ise bu parametrelerle beraber transformatör tasarım parametreleri yağlı ve kuru tip transformatör için değerlendirilerek transformatör ağırlıkları karşılaştırılmıştır [25].

Transformatör tasarım optimizasyonunda kullanılan algoritmalar ise genetik algoritma [2], [16], [18], ateş böceği algoritması [5], [9], [12], [17],[20], kır kurdu [19], tabu arama [6], yer çekimsel arama [7] algoritmalarıdır. Transformatör tasarımı optimizasyonuna dair farklı algoritmalar literatürde kullanılmış olsa da ateş böceği ile transformatör optimizasyon çalışmaları az sayıda olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada transformatörün ağırlığının, akım yoğunluğu(s) ve demir kesit uygunluğu(C) kısıtlamaları ele alınarak, sezgisel algoritmalarından biri olan ateş böceği algoritması yöntemi ile minimize edilmesi hedeflenmiştir. Çalışma, tasarlanan 50 kVA'lık transformatör ele alınarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen transformatörün matematiksel modeli literatürdeki transformatör çalışmaları baz alınarak oluşturulmuştur [16], [21]. Ele alınan transformatörün etiket değerleri Tablo1'de verilmiştir.

Tablo 1. Transformatör Etiket Değerleri

Tipi	Yağlı tip	%uk	% 4.5
Görünür Gücü	50 kVA	Sargı bağlantı şekli	Üçgen/Yıldız

Nominal Gerilim	34.5/0.4 kV	Frekans	50 Hz
Nominal Akım Değeri	0.8367 A	Soğutma tipi	ONAN
Boşta Çalışma Akımı	2.76 A	Verim	97.06

Materyal ve Yöntem

Çalışmada son zamanlarda birçok alanda sıklıkla kullanılmaya başlanılan ateş böceği algoritması, 50 kVA'lık görünür güce sahip üçgen yıldız bağlı yağlı tip transformatörün ağırlık probleminin optimize edilmesinde kullanılmıştır.

Ateş Böceği Algoritması

Ateş böceği algoritması, ateş böceklerinin bazı koşullarda gösterdikleri tepkileri baz alarak geliştirilmiş meta sezgisel bir algoritmadır. Bu algoritma, Ulusal Fizik Laboratuvar'ında Kıdemli araştırma bilimcisi olan Xin-She Yang tarafından 2008 yılında bulunmuştur.

Doğadaki birçok ateş böceği kısa ve ritmik ışıklar üretir. Bu ışık karın bölümünün son kısmında, lüsiferin maddesinin lüsiferinaz enziminin katalizörliğünde kademeli olarak oksijen ile yanması sonucu meydana gelir. Meydana gelen ışık karşı cinsiyet etkilime ve avlanma durumunda avı kendine çekmek için üretilir. Ateş böcekleri bu üretilen ışığa göre yönelim sağlarlar. Eğer bir ateş böceği kendinden daha parlak bir ateş böceği bulursa ona yönelim sağlayacaktır şayet kendinden daha parlak bir ateş böceği bulamazsa kendi etrafında rastgele hareket edecektir. Bu parlaklık derecesi ışık yoğunluğuna ve mesafeye bağlıdır. FA algoritması sürü tabanlı bir algoritmadır. Sürü algoritmaları, temel olarak sürüde bulunan bireylerin pozisyonunun, sürünün en iyi pozisyonuna sahip olan bireyine yaklaştırılmasına dayanır [23]. Ateş böceği algoritması, ateş böceklerinin oluşturdukları ışık ve bu ışığın parlaklığına göre ateş böceklerinin hareketini temel olarak şekillenmiştir. Sürüden esinlenen davranışlar algoritmanın üç temel kuralını oluşturmaktadır. Bunlar:

- 1) Tüm ateş böcekleri cinsiyetsizdir, böylelikle cinsiyet bakılmaksızın bir ateş böceği diğer ateş böceklerini çekebilir [22].
- 2) Çekicilik parlaklıkla doğru orantılıdır, böylece ışık yayan iki ateş böceğinden, az parlaklığa sahip olan daha parlak olana yönelir. Parlaklık aradaki uzaklığa bağlı olarak değişir. Eğer parlaklık seviyesi eşit ise rastgele hareket meydana gelir [13].
- 3) Parlaklık uygunluk (amaç) fonksiyonunu ile belirlenir [13]. En parlak ateş böceğini optimal değer olarak kabul eden bir amaç fonksiyonu vardır.

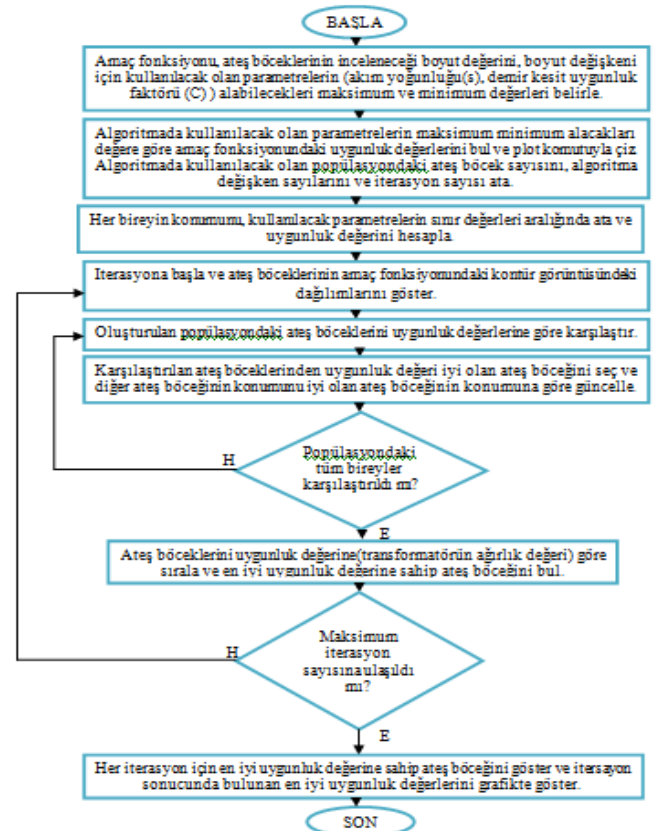
Ateş böceği algoritmasının diğer algoritmalara göre avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- 1) Ateş böceği algoritması karmaşıklık yönünden basit bir algoritmadır. Belirlenen parametre sayısına göre algoritmada döngü oluşturularak problem çözümüne gidilebilir.

- 2) FA algoritması diğer algoritmalara iki büyük avantajı: otomatik alt bölümlere ayrılma ve problemleri multimodalite ile çözmesidir [24].
- 3) Diğer algoritmalar sadece en iyi yerel sonuca odaklıyken FA algoritması yerel en iyi sonuçla beraber global en iyi sonuca odaklıdır.

Çalışmada kullanılan algoritmanın optimizasyon işlemi için ilk olarak amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan amaç fonksiyonu transformatörün ağırlık değeri olup baz alınan parametrelere göre transformatör ağırlığının değişimini gösteren fonksiyondur. Bununla beraber algoritmayı oluşturacak parametrelerin değerleri, literatürde ateş böceği algoritmasına dair yapılan çalışmalar incelendikten sonra uygun aralıklarda belirlenmiştir. Optimize edilecek olan akım yoğunluğu ve demir kesit uygunluğu parametrelerin maksimum ve minimum değer aralıklarına belirlenerek oluşturulacak popülasyondaki ateş böceklerinin konumların bu değerler arasında olması sağlanmıştır. Konumu oluşturulan her ateş böceğinin amaç fonksiyonundaki uygunluk değeri yani atanan optimizasyon parametrelerin aldıkları değer aralıklarına göre transformatörün ağırlığı hesaplanmıştır. Her bir iterasyonda oluşturulan popülasyondaki ateş böcekleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonrası en iyi uygunluk fonksiyonuna sahip ateş böceği bulunmuş ve diğer ateş böceklerinin konumları bu ateş böceğine göre güncellenmiştir. Her iterasyon sonucu en iyi uygunluk değerine sahip ateş böceği bulunmuş olup transformatördeki ağırlık miktarını düşüşü incelenmiştir.

Transformatörün optimizasyonu için kullanılan ateş böceği algoritmasının işlem basamakları Şekil 1'de yer almaktadır.



Şekil 1. Ateş böceği algoritması akış şeması

Belirtilen temel kurallara göre ateş böceği algoritması oluşturulduğunda sürünün en parlak ateş böceğine yönelim sağlandığı baz alınarak bir amaç fonksiyonu seçilir. Parlaklık aradaki mesafeye göre değiştiğinden dolayı ters kare yasasına göre fiziksel bir büyüklüğün şiddeti o fiziksel büyüklüğün kaynağından uzaklığının karesiyle ters orantılı olduğundan ışık şiddeti $I(r)$ Eş. 1' de gösterildiği gibidir.

$$I(r) = \frac{I(s)}{r^2} \quad (1)$$

Burada $I(s)$; ışık kaynak şiddeti, r ; uzaklığı temsil etmektedir. Bir ortamda ışık yayılırken belli bir miktar emilime uğrar [13]. Bu emilim katsayısını (γ)hesaba katıldığı zaman denklem Eş. 2' deki gibi olmaktadır.

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (2)$$

Denklemde I_0 değişkeni başlangıç ışık şiddetini temsil etmektedir. Bir ateş böceğinin çekiciliği, komşu ateş böceklerinin gördüğü ışık yoğunluğuyla orantılı olduğundan, ateş böceğinin çekiciliğini[22], $\beta(r)$ ifadesini Eş.3'te belirttiği gibi bulabiliriz.

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3)$$

Eş. 3'te belirtilen β_0 ; $r=0$ değerindeki çekicilik değeridir. Yani iki ateş böceğinin arasındaki mesafenin sıfıra eşit olduğu çekicilik değeridir. Ateş böceklerini iki boyutlu düzlemde incelediğimizde i ve j ateş böceklerinin Kartezyen düzleminde konumları $X_i(x_i, y_i)$, $X_j(x_j, y_j)$ şeklinde olacaktır. İki ateş böceğinin arasındaki mesafe(r_{ij}) Eş 4' teki formül ile hesaplanır.

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

Ateş böceklerinden j ateş böceğinin daha parlak olduğunu varsayarsak i ateş böceği j ateş böceğine yönelir. Böylece i ateş böceğinin mevcut konumu değişir. Bu yeni konum Eş. 5' te gösterilmektedir.

$$X_{i(\text{yeni konum})} = X_{i(\text{bir önceki konum})} + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (X_j - X_i) + \alpha \epsilon_i \quad (5)$$

Eş. 5'te tanımlanan ifadedeki α terimi rastgeleliği temsil etmektedir. Genellikle α terimi [0 1] aralığında değer alır. ϵ_i , Gauss dağılımından çizilen rastgele sayıların vektörüdür [22]. Bazı çalışmalarda ϵ_i ifadesi yerine $(\text{rand} - \frac{1}{2})$ ifadesi kullanılır. İki ifade birbirine eşittir ve rand [0 1] değer aralığı içinde eşit olarak dağıtılmış bir rastgele sayı üreticidir [22].

Ateş böceği algoritması kuralları ve gerekli eşitlikler göz önünde bulundurularak program kodu oluşturulup optimizasyon gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

Ateş Böceği Algoritması Demo Kod

Ateş böceği algoritması farklı platformlarda kodlara dökülebilir. Demo kodlar MATLAB platformunda denenmiştir. Bu kodlar Şekil 2'de gösterilmiştir.

```

CostFunction=@(x)max4(x);
nVar=2;
VarSize= 1:2;
VarMin=[2.2 4];
VarMax= [3.5 6];
MaxIt=10;
nPop=10;
gamma=1;
beta0=1;
alpha=0.2;
alpha_damp=0.98;
delta=0.05*(VarMax-VarMin);
for i=1:nPop %%Başlangıç popülasyonu
    pop(i).Position=unifrnd(VarMin,VarMax,VarSize);
    pop(i).Cost=CostFunction(pop(i).Position);
    if pop(i).Cost<=BestSol.Cost
        BestSol=pop(i);
    end
end
for it=1:MaxIt
    for i=1:nPop
        for j=1:nPop
            if pop(j).Cost< pop(i).Cost
                newsol.Position = pop(i).Position ...
                    + beta*rand(VarSize).*(pop(j).Position-pop(i).Position) ...
                    + alpha*e;%% ana fonksiyon
                newsol.Position=max(newsol.Position,VarMin);
                newsol.Position=min(newsol.Position,VarMax); end
            end
        end
    end
end

```

Şekil 2. Ateş böceği algoritması demo kodu

Yağlı Tip Transformatör Tasarımı

Yapılan çalışmada ateş böceği algoritmasının değişkenlerini belirleyecek transformatöre ait iki parametre kullanılmıştır. Bunlar, akım yoğunluğu ve demir kesiti uygunluğu parametreleridir.

En uygun verim bakır kayıplarının demir kayıplarına eşit olması ve bakır kayıplarının da primer ve sekonder sargılara eşit bir şekilde bölünmesi halinde erişilmiş olur [21]. Bakır ve demir kayıplarının oranı Eş.6' da belirtildiği gibidir.

$$\xi = \frac{P_{cu}}{P_{fe}} \quad (6)$$

Burada P_{cu} bakır kayıplarını, P_{fe} demir kayıplarını, ξ ise kayıp oranını ifade etmektedir. P_{cu} Eş. 7'de, P_{fe} Eş. 8'de tanımlanmıştır.

$$P_{cu} = 2.7 * s^2 \quad \text{Watt/kg} \quad (7)$$

$$P_{fe} = P_{10} * \xi_2 * \left(\frac{B}{10000}\right)^2 \quad \text{Watt/kg} \quad (8)$$

Transformatör saçlarının işlenmesi sonucunda denklem Eş. 8' de verilen demir kayıpları ξ kayıp faktörü kadar artar

[12]. Eş. 8'de, P_{10} , kayıp faktörü ξ_2 , saçların işlenmesi sonucunda husule gelen ilave kayıp faktörü, B, yağlı trafolarde çekirdek endüksiyonudur. Eş. 7'de belirtilen, akım yoğunluğunu ifade etmektedir ve yağlı tip transformatörler için değer aralığı 2.2-3.5 (A/cm^2) iken kuru tip transformatörler için 1.7-2 (A/cm^2) arasında değişmektedir. Transformatörün demir kesiti hesabı Eş.9'da verilmiştir.

$$q_{fe} = C \sqrt{\frac{1000 * S}{3f}} \quad (cm^2) \quad (9)$$

Burada S , görünür güç, f , frekans, q_{fe} , demir kesiti, C ise demir kesiti uygunluk faktörüdür. Demir kesiti uygunluk faktörü yağlı tip ve kuru tip transformatörlerde değer aralığı değişmektedir. Yağlı tip transformatörlerde 4 ile 6 ($cm^2 joule^{-\frac{1}{2}}$) kuru tip transformatörlerde 5.9 ile 10.6 ($cm^2 joule^{-\frac{1}{2}}$) aralığında değer alır.

Artık alt ve üst gerilim sargılarının bakır ağırlıkları ifadesi Eş.10 ve Eş.11'de verilmiştir.

$$G_{cu1} = 3 * 10^{-5} * \gamma_{cu} * w_1 * q_1 * l_{m1} \quad kg \quad (10)$$

$$G_{cu2} = 3 * 10^{-3} * \gamma_{cu} * w_2 * q_2 * l_{m2} \quad kg \quad (11)$$

Denklemlerde belirtilen γ_{cu} değişkeni, bakır özgül ağırlığını, l_{m1} ve l_{m2} değişkeni, üst ve alt gerilim sargılarının ortalama uzunluklarını, w_1 ve w_2 değişkeni, üst ve alt gerilim sargılarının sarım sayısını, q_1 ve q_2 üst ve alt gerilim sargısı sargı kesitlerini ifade etmektedir. Toplam demir ağırlığı Eş.12 'de belirtildiği gibidir.

$$G_{fe} = 10^{-3} * \gamma_{fe} (0.3 * L_s * q_{fej} * 2(2M * 0.8D)q_{fej} \quad (12)$$

Eş. 12'de mevcut olan γ_{fe} , demir özgül ağırlığını, D , demir çekirdeği çapını, q_{fej} , boyunduruk bacak kesitini, L_s , pencere veya bacak yüksekliğini temsil etmektedir. M değişkeni ise Eş. 13'te verilmiştir.

$$M = 0.851D + 0.1L_s \quad (13)$$

G_{feb} , her üç bacağın ağırlığı olup şu şekilde ifade edilir.

$$G_{feb} = 3 * 10^{-4} * \gamma_{fe} * q_{fej} * L_s \quad (kg) \quad (14)$$

Toplam boyunduruk ağırlığı Eş. 15'te verilmiştir.

$$G_{fej} = 2 * 10^{-3} * \gamma_{fe} * q_{fej} (2a + b_{bacak}) \quad (kg) \quad (15)$$

Bacak genişliği (b_{bacak}), değeri 0.851D'ye eşittir. Trafonun demir gövdesinde meydana gelen toplam demir kaybı şu şekildedir.

$$P_{fe} = P_{febacak} + P_{fej} \quad (Watt) \quad (16)$$

Son olarak trafonun toplam kaybı (P_k) ve buna bağlı olarak verim denklemi, toplam ağırlık (G_{top}), verilen eşitliklerde belirtilmiştir.

$$P_k = P_{cu} + P_{fe} \quad (Watt) \quad (17)$$

$$verim = \frac{s}{s + 10^{-3} P_k} \quad (18)$$

$$G_{top} = G_{cu1} + G_{cu2} + G_{fe} + G_{feb} \quad (kg) \quad (19)$$

Algoritmada temel olarak kullanılan akım yoğunluğu ve demir kesit uygunluğu parametrelerin değer aralığı Eş.20 ve Eş 21'de belirtildiği gibidir.

$$2.2 \leq s \leq 3.5 \quad A/cm^3 \quad (20)$$

$$4 \leq C \leq 6 \quad cm^2 joule^{-\frac{1}{2}} \quad (21)$$

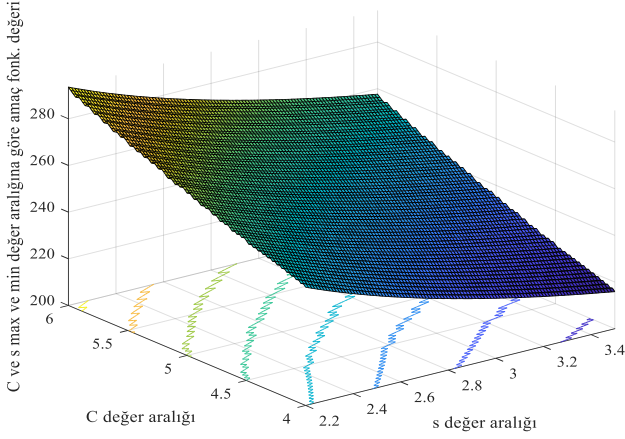
Çalışmada akım yoğunluğu ve demir kesit uygunluğu Eş.20 ve Eş 21'de belirtilen değer aralığında tutularak verim ve trafodaki toplam ağırlığın en iyi değeri bulunmaya çalışılmıştır.

Simülasyon Sonuçları

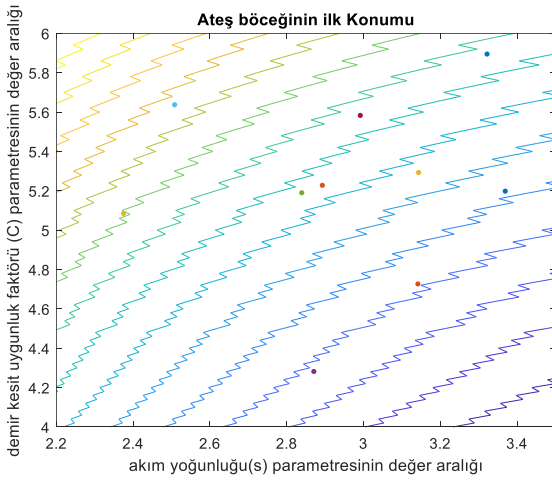
Çalışma MATLAB platformunda gerçekleştirilmiştir. Amaç fonksiyonu, transformatörün toplam ağırlığı, parametreler ise akım yoğunluğu, demir kesit uygunluk faktörü olarak belirlenmiştir.

İlk olarak transformatörün akım yoğunluğu ve demir kesit uygunluk faktörü parametreleri Eş. 20 ve Eş.21 'de belirtilen değer aralıklarında tutularak amaç fonksiyonunda alabilecekleri maksimum ve minimum değerler üç boyutlu eksende çizdirilmiştir. Burada amaç fonksiyonu transformatörün ağırlık değeridir ve akım yoğunluğu ve demir kesit uygunluğu parametrelerin alabileceği her değere karşılık gelen transformatör ağırlığının üç boyutlu çizimi Şekil 3'te yer almaktadır.

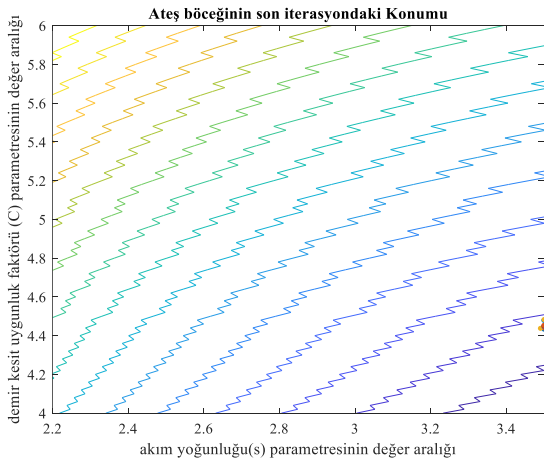
Ateş böceklerinin güncel ve yeni konumları iki boyutlu eksende incelenmiştir. Eksen boyutunun iki boyutlu seçilme nedeni amaç fonksiyonunda iki değişken parametre olan akım yoğunluğu ve demir kesit uygunluk faktörünün kullanılmasıdır. Bu parametreler ateş böceğinin konumlarını belirleyen temel unsurlardır. Algoritma başlangıçta değişken parametrelerin değer aralıklarında belirtilen değerlere göre popülasyondaki ateş böceklerinin konumlarını rastgele atamaktadır. Atanan konum değerlerine göre her bir ateş böceğinin uygunluk değeri amaç fonksiyonuna bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bulunan her bireyin uygunluk değeri ateş böceklerinin parlaklığını temsil etmekte olup transformatörün ağırlığına eş değerdir. Kullanılan algoritmada popülasyon sayısı ve iterasyon sayısı 10 olarak belirlenmiştir. Ateş böceklerinin atanan ilk konumlarına göre dağılımları çizdirilen amaç fonksiyonundaki kontür görüntüsündeki dağılım durumları Şekil 4'te, iterasyon sayısı tamamlandıktan sonraki dağılım durumları Şekil5'te yer almaktadır.



Şekil 3. Üç boyutlu eksende çizdirilen amaç fonksiyonu



Şekil 4. Oluşturulan ilk popülasyondaki ateş böceklerinin konumlarına göre dağılımları



Şekil 5. Son popülasyondaki ateş böceklerinin konumlarına göre dağılımları

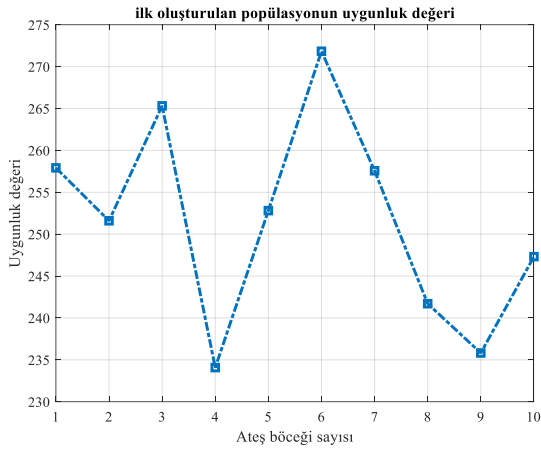
Şekil 3'te yer alan üç boyutlu çizimde x eksenini akım yoğunluğu parametresinin alabileceği maksimum ve minimum değer aralıklarını, y eksenini demir kesiti uygunluk faktörü parametresinin alabileceği maksimum ve minimum

değer aralığını, z eksenini ise bu iki parametrenin maksimum ve minimum değer aralıklarında alabilecekleri değerlere karşılık transformatörün toplam ağırlığını göstermektedir. Şekil 3'te elde edilen değerler ateş böceği algoritması uygulanmadan önce elde edilen değerlerdir. Algoritma işlenmeden önce elde edilen değerler transformatörün sahip olabileceği değer aralıklarını göstermektedir.

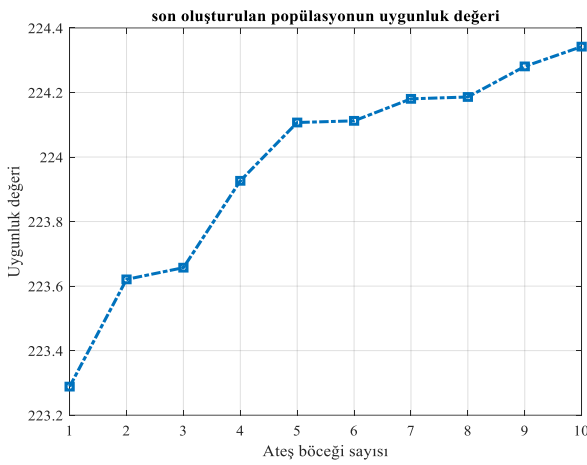
Şekil 4 incelendiğinde ateş böcekleri rastgele dağıldığı gözlemlenmiştir. Şekil 5'te ise Şekil 4'te algoritma tarafından ilk oluşturulan popülasyondaki ateş böceklerinin, akım yoğunluğu ve demir kesit uygunluk faktörü parametrelerinin değer aralığında, atanan konumlarına göre dağılımlarını ve bu dağılımın Şekil 3'te gösterilen üç boyutlu amaç fonksiyonunun kontür görüntüsünde aldıkları konumları göstermektedir. Oluşturulan popülasyon konum değerleri belirlenen parametreler (akım yoğunluğu, demir kesit uygunluğu) aralığında random olarak atandığı için ateş böceklerinin her birinin konumları farklı olup aralarındaki uzaklık farklı mesafededir.

Şekil 5 incelendiğinde ateş böceklerinin bir noktada toplandığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni algoritmayı oluşturulan temel unsurlardan, bir ateş böceği kendinden daha parlak olan ateş böceğine yönelir kuralı, kaynaklanmaktadır. Bu kural, amaç fonksiyonunun minimize veya maksimize bir fonksiyon olmasına bağlı olarak ateş böceklerinin yönelimine göre değişebilir. Algoritmada önemli olan en iyi amaç fonksiyonuna ulaşmaktır. Amaç fonksiyonu minimize bir fonksiyon ise ateş böcekleri uygunluk değeri az olan ateş böceğine yönelim sağlayacaklardır fakat amaç fonksiyonu maksimize bir fonksiyon ise ateş böcekleri uygunluk değeri yüksek olan ateş böceğine yönelim sağlayacaklardır. Her iki yönelim durumunda yönelen ateş böceğinin konumu uygunluk değeri iyi olan ateş böceğinin konumuna göre güncellenecektir. Bu işlem algoritmada belirtilen iterasyon sayısı tamamlanana kadar devam edecektir.

Çalışmadaki amaç transformatörün ağırlığının minimize edildiği değerlere ulaşmak olduğu için amaç fonksiyonu minimize bir fonksiyondur. Bundan dolayı ateş böceklerinin kendinden daha az uygunluk değerine sahip olan ateş böceğine yöneldikleri gözlemlenmiştir. Şekil 6 ve Şekil 7'de ilk ve son oluşturulan popülasyondaki bireylerin uygunluk değeri gösterilmiştir. İlk ve son popülasyondaki ateş böceklerinin konumlarına göre transformatörün ağırlık değerleri ve her birey için ağırlık değerinde meydana gelen azalma miktarı Çizelge 2'de belirtilmiştir.



Şekil 6. İlk popülasyondaki bireylerin uygunluk değeri



Şekil 7. Son popülasyondaki bireylerin uygunluk değeri

Şekil 6 ve Şekil 7 incelendiğinde son popülasyondaki ateş böceklerinin uygunluk değerleri, ilk popülasyondaki ateş böceklerinin uygunluk değerlerine göre daha yakın bir aralıkta değerler aldığı gözlemlenmektedir. Bununla beraber ilk oluşturulan popülasyondaki bireylerin uygunluk değer limitleri arasındaki farkın son popülasyondaki bireylerin uygunluk değer limitleri arasındaki farka göre daha fazla olduğu ve son popülasyondaki maksimum, minimum değerlerin ilk popülasyondaki değerlere göre daha azaldığı dikkat çekmektedir. Şekil 6 ve Şekil 7 ateş böceklerinin yönelimleri sonucu güncellenen konumlarına göre uygunluk değerlerinin değişimini ve buna bağlı olarak değişen parametrelerde en iyi transformatör ağırlığını açıkça göstermektedir. Tablo 2'de ilk ve son popülasyondaki bireylerin konum değerlerinin nasıl değiştiği ve buna bağlı olarak transformatörün ağırlık düşüşü belirtilmektedir.

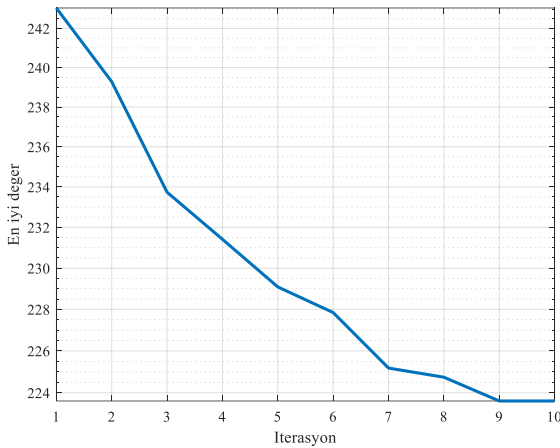
Tablo 2. İlk popülasyon ve son popülasyondaki ateş böceklerin konum ve transformatörün ağırlık değerleri

Ateş Böceği Sayısı	İlk Popülasyon	Transformatör Ağırlık Değerleri(kg)	Son Popülasyon	Transformatör Ağırlık Değerleri(kg)	Transformatör Ağırlığının Düşüş Miktarı (%kg)
1.	[3.3218 5.8949]	257.9183	[3.5000 4.4336]	223.2885	% 13.426
2.	[2.8927 5.2280]	251.5988	[3.5000 4.4402]	223.6208	% 11.120
3.	[2.3746 5.0848]	265.3182	[3.4905 4.4377]	223.6571	% 15.702
4.	[2.8705 4.2819]	234.0765	[3.5000 4.4462]	223.9263	% 4.336
5.	[2.8391 5.1899]	252.8128	[3.5000 4.4497]	224.1070	% 11.354
6.	[2.5079 5.6374]	271.8368	[3.5000 4.4784]	224.1121	% 17.556
7.	[2.9916 5.5831]	257.5709	[3.5000 4.4512]	224.1803	% 12.963
8.	[3.3692 5.1982]	241.7030	[3.5000 4.4798]	224.1861	% 7.247
9.	[3.1416 4.7268]	235.8194	[3.5000 4.4532]	224.2808	%4.892
10.	[3.1434 5.2936]	247.3203	[3.5000 4.4829]	224.3421	%9.290

Tablo2 incelendiğinde ilk oluşturulan popülasyonda transformatör ağırlığı yaklaşık olarak 275-230 kg arasında

değiştirdiği ve bireylerin popülasyon uygunluk değerlerinin ortalaması alındığında transformatörün ağırlığı 251.5975 kg civarında olduğu, son popülasyonda ise transformatör ağırlığı 225-223 kg arasında değiştiği ve uygunluk değer ortalaması 223.9701kg olduğu belirlenmiştir. Bu iki değer baz alındığında transformatörün ilk ağırlık değeri ile son ağırlık değeri arasında yaklaşık % 11'lik bir azalma olduğu saptanmıştır. Bu değer tatmin edici bir değerdir.

Algoritma tarafından üretilen her popülasyon incelenmiştir. Her iterasyon sonucunda popülasyon ki en iyi uygunluk değerine sahip ateş böceği baz alınmıştır. Her iterasyon sonucu ateş böceğinin sahip olduğu en iyi uygunluk değeri Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Her iterasyon sonucunda bulunan en iyi uygunluk değeri

Her bir iterasyon sonunda bulunan en iyi değer incelendiğinde ilk oluşturulan popülasyonda ki en iyi değer yani en düşük transformatör ağırlığı 242 kg iken son oluşturulan popülasyondaki en iyi değer 224 kg olarak gözlemlenmiştir.

Ateş böceği algoritmasında kullanılan bazı parametrelerin değerleri Tablo 3'de yer almaktadır.

Tablo 3: Ateş böceği algoritması parametre değerleri

Parametre	Değer
Ateş böceğinin incelendiği boyut değeri	2
Minimum değer aralıkları	[2.2 4]
Maksimum değer aralıkları	[3.5 6]
Maksimum iterasyon sayısı	10
Popülasyondaki birey sayısı	10
Havanın emilim katsayısı	1
Çekiciliğin $r=0$ daki değeri	1
Rastlantı değişkeni	0.2

Tablo 3'teki değerler, kullanılan parametrelerin sayısı ve bu parametrelerin değer aralığına göre belirlenmiştir. Havanın

emilim katsayısı, çekicilik ve rastlantı değişkeni değerleri sabit olarak alınmıştır[22].

Tablo 3'de ki değerlere göre elde edilen sonuçlar Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4: Ateş böceği algoritması sonucu elde edilen değerler

Değişken	Sembol	Değer
Demir kesiti uygunluk faktörü	C	4.4553 ($cm^2joule^{-\frac{1}{2}}$)
Sargılardaki akım yoğunluğu	s	3.5000 (A/cm^2)
Demir çekirdeğin çapı	D	12.3685 cm
Üst gerilim sargısı bakır ağırlığı	G_{cu1}	30.835 kg
Alt gerilim sargısı bakır ağırlığı	G_{cu2}	2.7374 kg
Toplam boyunduruk ağırlığı	G_{fej}	72.0815 kg
Her üç bacağın ağırlığı	G_{feb}	118.7317 kg
Toplam ağırlığı	G_{top}	224.3866 kg
Verim		97

Yapılan çalışmada bulunan değerler, daha önce genetik algoritma ile yağlı tip transformatörün maliyet optimizasyonu [16] çalışması sonucu elde edilen değerler ile kıyaslanmıştır. Elde edilen veri sonuçları Tablo 5'te yer almaktadır.

Tablo 5: GA ile FA ile bulunan değerler

	GA	FA
Amaç	Maliyet optimizasyonu	Ağırlık Optimizasyonu
Görünür gücü	100 Kva	50 Kva
Elde edilen (s) değeri	3.5	3.5000
Elde edilen (C) değeri	4.063	4.4553
Verim	%97.35	%97
Ağırlıktaki azalış miktarı(%)	% 10	% 11

Tablo 5'te yer alan GA ile yapılan çalışmada rastgele mutasyon değerleri yansıtılmıştır. Her iki çalışmada yağlı tip transformatör kullanılmıştır. Kullanılan transformatörlerin görünür gücü farklı olarak seçilmiştir. Görünür güçteki farklılık göz önünde bulundurularak genetik algoritma ile ateş böceği algoritmalarının optimizasyon işlemleri, bu işlemler aşamasında ele alınan parametre değerleri, algoritma karışıklığına göre karşılaştırılma yapılmıştır.

Ateş böceği algoritması ile elde edilen ağırlık azalış miktarının genetik algoritmaya göre daha fazla olduğu görülmektedir. Genetik algoritma ile yapılan çalışmada iki mutasyon değeri kullanılmıştır. Bu mutasyon değerlerine göre farklı değerler elde edilip değerlendirilmiştir. Bununla beraber genetik algoritma çalışmasında rastgele ve sınırlı mutasyon işlemlerinde farklı nesil sayıları belirlenmiştir. Bu nesil sayıları rastgele mutasyonda 300 olarak belirlenirken sınırlı mutasyonda 600 olarak belirlenmiştir. Bu nesil sayıları belirlenirken ağırlıktaki değişim değerinin miktarı göz önünde bulundurulmuştur. Sonuçlar her bir nesil sayısında 300 defa çalıştırılmış olup sonuçlar elde edilmiştir.

Ateş böceği algoritmasında önemli olan amaç fonksiyonun hangi değişkenlere bağlı olduğunu saptamak ve ateş böceklerinin konumlarını belirleyecek olan değişken sayısını belirlemektir. Ateş böceği algoritması farklı işlemlere (rastgele ve sınırlı mutasyon işlemleri) gerek duyulmadığından ve tek durum üzerinden değerlendirilmesinden dolayı genetik algoritmaya göre daha sade ve basit bir yapıdadır. Ateş böceği algoritması çalışmasında iterasyon sayısı ve popülasyon sayısı 10 olarak belirlenmiş ve 200 defa çalıştırılıp sonuçlar elde edilmiştir. Genetik algoritma çalışması ile kıyaslandığında bu verilerin daha düşük olduğu görülmektedir. Böylelikle ateş böceği algoritması ile daha az popülasyon sayısı, iterasyon sayısı ve simülasyonu çalıştırma sayısı sonucu verimli sonuçların daha kısa sürede elde edilebileceği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda ateş böceği algoritmasının genetik algoritmaya göre daha avantajlı olduğu kanısına varılmıştır.

Literatürde yağlı tip transformatörün ağırlık optimizasyonuna dair yapılan çalışmalar ve toplam ağırlık miktarındaki azalış miktarı Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: Yağlı tip transformatör ağırlık optimizasyonları

Çalışmalar	Optimizasyon Tekniği	Optimize Edilen Parametreler	Ağırlıkta ki azalış miktarı
Çelebi (2008)	GA	Akım yoğunluğu, demir kesit uygunluk faktörü	%10
Zile (2019)	FA-Karınca Koloni Algoritması(Hibrit Algoritma)	Transformatör tankımı oluşturan birleşenler	%5-%15

Ateş böceği Algoritması ile yağlı tip transformatör optimizasyonu	FA	Akım yoğunluğu, demir kesit uygunluk faktörü	%11
---	----	--	-----

Çalışmalar değerlendirildiğinde ateş böceği algoritmasının yapılan bu çalışmada problemin optimize edilmesinde uygun ve avantajlı bir algoritma olduğu ve ağırlık miktarındaki azalış miktarının makul miktarda olduğu belirlenmiştir. .

Tartışma

Bu çalışmada yağlı tip transformatörün akım yoğunluğu ve demir kesit uygunluk faktörü parametrelerinin en uygun değerlerde seçilerek transformatörün ağırlığı ve buna bağlı olarak maliyeti optimize edilmeye çalışılmıştır. Literatürde her ne kadar transformatör ağırlığı, verimi, maliyeti, hacmi optimize edilmesine yönelik çalışmalar yapılmış olsa da doğrudan ateş böceği algoritması ile yağlı tip transformatörün ağırlık optimizasyonu çalışmaları mevcut değildir.

Sonuç ve Öneriler

Çalışmada yağlı tip transformatörün ağırlık problemi optimize edilmiş ve transformatör ağırlığı düşürülmüştür.

Optimizasyon ateş böceği algoritması ile MATLAB platformunda gerçekleştirilmiştir. Algoritma parametreleri olarak popülasyon sayısı 10, iterasyon sayısı 10 olarak belirlenmiş olup mevcut simülasyon kodu 200 defa tekrarlanmıştır. Belirlenen popülasyon sayısı kadar birey oluşturulmuş ve iterasyon sayısına göre bireylerin, ilk oluşturulan popülasyondan son oluşturulan popülasyona kadar ki yönelimleri gözlemlenmiş bu gözleme dayalı olarak akım yoğunluğu ve demir kesit uygunluk faktörü parametrelerinin en uygun değeri saptanmaya çalışılmıştır.

Tasarım optimizasyonunda her iterasyon sonrası oluşturulan yeni ateş böceği bireylerinin uygunluk değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden ilk oluşturulan popülasyondaki ateş böceklerinin ile son oluşturulan popülasyondaki bireylerin konumları ve uygunluk değerleri göz önünde bulundurularak karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda akım yoğunluğu, ortalama olarak $3.50 A/cm^2$, demir kesit uygunluk faktörü ise $4.45-4.46 cm^2joule^{-\frac{1}{2}}$ değerleri alındığında transformatör ağırlığının en optimal değerde olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, her popülasyondaki ateş böceğinin sahip olduğu uygunluk değerine göre transformatör ağırlığı incelenmiş ilk ve son oluşturulan değerlere göre %11'lik civarında bir azalma elde edilmiştir. Transformatörün ağırlığı ve maliyeti arasındaki doğru orantı göz önünde bulundurularak bu azalma miktarının transformatörün maliyetini de aynı oranda azaltacağı kanısına varılmıştır. Bu da ateş böceği algoritmasının transformatör tasarımında gerek ağırlık gerekse maliyet ve verim optimizasyonunda etkin olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

İlerdeki çalışmalar, FA ile trafo tasarımında farklı değerler (verim, ağırlık, kayıplar vs.) optimize edilebilir. Bu çalışmanın devamı niteliğinde olabilecek bir çalışmada FA parametreleri (popülasyon ve iterasyon sayısı, rastgelelik değişken oranı vs.) farklı değerlerde denenerek trafo verimi, maliyeti ve ağırlığında ne gibi değişiklikler oluşturduğu incelenebilir. Bununla beraber geliştirilen ateş böcekleri algoritmaları, değiştirilmiş ateş böceği optimizasyon algoritması [13], kaotik ateş böceği algoritması optimizasyon algoritması gibi algoritmalar [14], yapılacak olan çalışmalarda tasarımı gerçekleştirilecek olan trafo veya diğer elektrik makinelerine uygulanarak elde edilecek olan değerler ile normal FA algoritması sonucu elde edilen değerler kıyaslanarak algoritmanın avantajlar ve dezavantajlar incelenebilir.

Etik Standartlar Beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Çıkar çatışması

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1] Erdoğmuş P., " Doğadan Esinlenen Optimizasyon Algoritmaları ve Optimizasyon Algoritmalarının Optimizasyonu" Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2016, 4, 290-304.
- [2] Çelebi M., " Genetik Algoritma ile Kuru bir Trafonun Maliyet Optimizasyonu" ELECO, 2008, 189-193.
- [3] Mutluer M., Bilgin O., " Application of Genetic Algorithm in Design Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Motor" Batman University International Participated Science and Culture Symposiom, 2012, 1(2), 233-239.
- [4] Yenipınar B., Yılmaz C., Işık M.F, " Asenkron Motorlarda Rotor Oluğunun Farklı Optimizasyon Yöntemleri ile Optimizasyonun Gerçekleştirilmesi ve Performansa Etkilerinin İncelenmesi", Politeknik Dergisi , 2018, 21(1), 1-6.
- [5] Demirdelen T., " Kuru Tip Transformatör Optimizasyonuna Yeni Bir Yaklaşım: Ateş Böceği Algoritması", Çukurova Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2018, 33(1), 87-96.
- [6] Tosun S., Öztürk A., Demir H., Kuru, L.,"Kuru Tip Transformatörün Tabu Arama Algoritması Yöntemi ile Ağırlık Optimizasyonu" İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 2012, 1(1), 17-26.
- [7] Alcan Y., Öztürk A., Özmen, Ö., "Yer Çekimsel Arama Algoritması İle Değişik Çalışma Koşulları İçin Transformatör Verim Optimizasyonu" Akademik Platform, 2014, 1-10.
- [8] Senthilkumar S., Karthick A., Madavan R., Arul Marcel Moshi A., Sundara Bharathi R., Soroja S., Sowmya Dhanalakshmi C., "Optimization of transformer oil blended with natural ester oils using Taguchi-based grey relational analysis", FUEL, 2021 . "www.elsevier.com/locate/fuel"
- [9] Demirdelen T., " New Heuristic Approach for Valume Calculation of Oil-Type Power Transformers: Firefly Algorithm" Majlesi Journal of Mechatronic Systems, 2018, 7(4), 41-46.
- [10] Kul S., Celtek S.A, Iskender.I, "Metaheuristic Algorithms Based Approaches for Efficiency Analysis of Three-Phase Dry-Type Transformers", Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2021, 9(4), 889-903.
- [11] Alhan L., "Dağıtım Transformatörlerinin Meta Sezgisel Algoritmalarla Tasarım Optimizasyonu",Doktora Tezi, Bilgisayar ve Bilişim Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2017.
- [12] Zile M., " Optimal Desing of Power Transformer Tank Using Ant/Firefly Hybrit Heuristic Algorithm" Turkish Journal of Engineering(TUJE), 2020, 4(1), 17-22.
- [13] Aydılek İ., " Değiştirilmiş Ateş Böceği Optimizasyon Algoritması ile Kural Tabanlı Çoklu Sınıflama Yapılması" Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 2017, 32(4), 1097-1107.
- [14] Pamuk N., " Kaotik Ateş Böceği Optimizasyon Algoritması Kullanılarak Termik Güç Santralleri Etkisindeki Ekonomik Yük Dağılımı Problemlerinin Çözümü" Pamuk/ Kırklareli Univesity Journal of Engineering and Science, 2016, 2, 38-59
- [15] Esenboğa B., Demirdelen T., "Efficiency and Cost Based Multi-Optimization and Thermal /Electromagnetic Analyses of 3-Phase Dry Type Transformer", IETE Journal of Research, https://doi.org/10.1080/03772063.2020.1732841, 2020.
- [16] Çelebi M., " Genetik Algoritma ile Yağlı Bir Trafonun Maliyet Optimizasyonu" Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2007, 3(1), 41-48.
- [17] Aksu İ.Ö, Demirdelen T.,"A Comprehensive Study on the Dry Type Transformer Design with Swarm -Based Metaheuristic Optimization Methods for Industrial Application", Energy Sources Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 2018, 40(14),1743- 1752.
- [18] Wang T., Liu J.,Wang Y., Hui L.,"Optimization of Structural Parameters for a New-Type Magnetic Integration Structure CRT Considering Loss and Cost", IEEE Access, 2020, vol.8, 68525-68532.
- [19] Abdelwanis M.I., Abaza A., El-sehiemy R.A, Ibrahim M.N, Rezk A. "Parameter Estimation of Electric Power Transformers Using Coyote Optimization Algorithm with Experimental Verification" IEEE Access, 2020, vol. 8, 50037-50045.
- [20] Demirdelen T., Optimal Design and Experimental Validtation Long-Lasting , Low-Loss Transformer for Low Power Renewable Energy System" Energy

- Sources Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 2019, 41(20),2534- 2548.
- [21] Boduroğlu T, "Transformatörler Cilt 1" İstanbul, Beta Basım, 1952, 23-145
- [22] Yang X.S, " Firefly Algorithm", Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms, United Kingdom, Luniver Press ,2010, 50-66.
www.luniver.com
- [23] Özsaglam M.Y, Çunkaş M., " Optimizasyon Problemlerinin Çözümü için Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması", Politeknik Dergisi, 2008, 11(4), 299-305
- [24] Yang X.S and He H., "Firefly Algorithm:Recent Advances and Applications",Int.Swarm Intelligence, 2013,Vol. 1, No. 1, pp. 36-50. DOI: 10.1504/IJSI.2013.055801
- [25] Tören M., Çelebi M., " Weight Comparison of Oil and Dry Type Distribution Transformers", International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2016, 10(7), 942-947.



Eksenel akılı tam adım sargılı anahtarlamalı relüktans makinasının stator/rotor kutup şekillerinin motor performansına etkisi

The effect of stator/rotor pole shapes of the fully pitched axial flux switched reluctance machine on the motor performance

Cihan Şahin*

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik Programı, cihan.sahin@cbu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6430-7827>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 20 Şubat 2022
Revizyon 16 Mart 2022
Kabul 9 Nisan 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

*Eksenel,
Anahtarlamalı relüktans makinası,
Tam adım sargı*

ÖZ

Anahtarlamalı Relüktans Makinaları (ARM) çeşitli teknolojik alanlarda özellikle de elektrikli araç teknolojisinde tercih edilen elektrik motorlarından biridir. Düşük maliyeti, güvenilirliği, sağlamlığı ve yüksek hata tolerans yeteneği gibi özellikleri, tercih edilmelerinin en önemli sebeplerindedir. Ayrıca, son yıllarda elektrik makinalarının radyal tasarımı yerine eksenel tasarımı ile ilgili araştırmalar da giderek artmaktadır. Literatürde, eksenel akılı ARM'ler üzerine geometrik tasarım ve kontrolü hakkında çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar incelendiğinde genel olarak kısa adım sargılı olarak da bilinen geleneksel ARM'ler tercih edilmiştir. Bu çalışmada tam adım sargılı eksenel akılı ARM'nin stator/rotor kutup şekillerinin motor performansına etkisi incelenmiştir. Tam adım sargılı ARM'ler sargı yapısından dolayı fazlar arasında oluşan karşıt kuplaj etkisiyle, geleneksel ARM'lere göre daha yüksek moment üretmektedirler. Çalışma kapsamında, Model-1(kavisli), Model-2 (keskin) ve de Model-3 (yuvarlak) olmak üzere üç farklı stator/rotor kutup yapısına sahip tam adım sargılı eksenel akılı ARM modeli önerilmiş, tüm modellerin 3B (üç boyut) magnetostatik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları karşılaştırılarak, tasarlanan modeller için en uygun kutup yapısının keskin köşeli Model-2 yapısı olduğu görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 February 2022
Received in revised form 16 March 2022
Accepted 9 April 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

*Axial,
Switched reluctance machine,
Fully-pitched winding*

ABSTRACT

Switched Reluctance Machines (SRMs) are one of the preferred electric motors in various technological fields, especially in electric vehicle technology. Features such as low cost, reliability, robustness and high fault tolerance are the most important reasons for their preference. In addition, in recent years, researches on axial design instead of radial design of electrical machines have been increasing. In the literature, there are various studies on geometric design and control of axial flux SRMs. When these studies are examined, conventional SRMs, also known as short pitched winding, have been preferred. In this study, the effect of stator/rotor pole shapes of the fully pitched axial flux SRM on the motor performance was investigated. Fully pitched SRMs produce higher torque compared to conventional SRMs with the mutual coupling effect between phases due to their winding structure. Within the scope of the study, a fully-pitched winding axial flux SRM model with three different stator/rotor pole structures, Model-1 (curved), Model-2 (sharp) and Model-3 (round), was proposed, and all models were 3D (three-dimensional) magnetostatic analyzes were carried out. By comparing the obtained analysis results, it has been seen that the most suitable pole structure for the designed models is the Model-2 structure with sharp corners.

Doi: 10.24012/dumf.1076302

* Sorumlu Yazar

Giriş

Son yıllarda hibrit ve elektrikli araçların üretiminde gözle görülür bir artış olmaktadır. Bunun en önemli sebebi hiç kuşkusuzdur ki fosil yakıtların azalması ve çevre kirliliğinde meydana gelen artıştır. Hibrit ve elektrikli araçlar, yakıt noktasında verimliliği ve düşük emisyonları nedeniyle gelecek yıllarda, taşımada önemli bir role sahip olacaktır [1]. Verimlilik, yüksek güç yoğunluğu, daha yüksek moment, düşük gürültü ve daha az maliyet, taşıma araçları için üretilen çekiş motorlarından istenen en temel özelliklerdir [2]. Literatürde hibrit ve elektrikli araçlar için relüktans, sabit mıknatıslı vb. farklı elektrik motorları tercih edilmektedir [3]. Günümüzde, bu motorlar içerisinde sabit mıknatıslı motorların yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir [3]. Fakat bu noktada mıknatıs, motor üreticileri için büyük bir sorun olarak karşısına çıkmaktadır. Üretim hacminin artması ve mıknatısın doğa da nadir olarak bulunması motor ve bu motorları kullanacak olan araç üreticilerini gelecek noktada kaygılandırmaktadır [4]. Bu durum; üreticileri, otomotiv uygulamalarında çekiş motoru olarak mıknatıs azaltılmış veya mıknatıssız motorları tercih etmeye yönlendirmektedir [5]. ARM'ler, rotorunda mıknatıs veya sargı bulundurmadığından dolayı, hibrit ve elektrikli araçlar için alternatif çekiş motorlardan biri olarak gösterilmektedir [4-7]. Ayrıca, dört bölgeli çalışma, genişletilmiş hız, sabit güç aralığı gibi özelliklere sahip olması da ARM'leri otomotiv uygulamaları için uygun bir motor konumuna getirmektedir [8]. Tüm bunlara ilave olarak düşük kayıplı silikon çelik ve konsantre stator sargılarına ihtiyaç duyması yüksek sıcaklıklarda çalışma avantajını da sağlamaktadır [9]. Ekonomik açıdan incelendiğinde ise ARM'ler sabit mıknatıslı motorlara göre daha sağlam, yapımı daha kolay ve ucuzdur [10]. ARM'ler yüksek hata tolerans yeteneği, zorlu ortamlarda çalışabilme gibi birçok avantaja sahip olmasının yanında, ayarlanabilir hız uygulamaları için de güçlü bir aday olması otomotiv uygulamalarına ilave olarak elektrikli uçak uygulamaları için de uygun bir elektrik motorudur [6],[11]-[13].

ARM'ler bu avantajlarının yanında bazı dezavantajlara da sahiptir. Doğrusal olmayan moment üretimi nedeniyle yüksek moment dalgalılığına sahiptir [14]. Stator ve rotor çıkıntılı olduğundan faz değişim periyotlarında meydana gelen yüksek moment dalgalanmasının bir sonucu olarak ARM'lerde akustik gürültü ve salınımlar meydana gelmektedir [15],[16]. Elektrikli araçlarda ve de servo sistemlerde yüksek performans elde etmek için düşük salınımlar ve düşük akustik gürültü oldukça önemlidir. Bunun için moment dalgalılığının azaltılması gerekmektedir [14]. ARM'lerin moment dalgalılığını azaltmak için literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Tüm bu çalışmalar genel olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bunlardan biri makinanın geometrik yapısında yapılan optimizasyonlar diğeri ise kontrol algoritmalarında yapılan çalışmalardır [11],[17]. Burada dikkat edilmesi gereken önemli nokta stator ve rotor kutup açıları, kutup sayısı, hava aralığı gibi geometrik yapıda gerçekleştirilen düzenlemeler mevcut ve kullanılmakta olan motorlara uygulanamamaktadır. Makinanın manyetik karakteristiğini iyileştirmek için kullanılan bu yöntem diğer bir ifadeyle yeni bir ARM tasarımı demektir [18],[19]. Moment dalgalılığını azaltmak

için kontrol yöntemi olarak da akıllı algoritmalar (bulanık mantık, sinir ağı vb), anlık moment kontrolü ve uyarlanabilir kayan mod gibi farklı kontrol teknikleri kullanılmaktadır [11],[20]. Kullanılmakta olan ARM'ler için kontrol yöntemi yazılımları güncellenerek uygulanabilmektedir [19].

ARM'lerin faz sargıları incelendiğinde ise, kısa adım olarak stator kutuplarının etrafına sarıldığı görülmektedir. Bundan dolayı geleneksel ARM'ler kısa adım ARM'ler olarak da bilinmektedirler. Tam adım sargı yönteminde ise faz sargıları stator oluklarına dağıtılmaktadırlar [21]. Gerçekleştirilen bu çalışmada eksenel akılı tam adım sargılı ARM için farklı stator/rotor kutup modelleri önerilmiş, 3B olarak magnetostatik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmanın bölümleri ise şu şekilde düzenlenmiştir. Giriş bölümünün ardından ikinci bölümde tam adım sargılı ARM'ler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde eksenel akılı ARM'ler hakkında genel bilgiler verilerek kısa ve tam adım sargılı eksenel ARM karşılaştırılması sunulmuştur. Dördüncü bölümde ise önerilen eksenel akılı tam adım sargılı ARM modelleri ve genel özellikleri verilmiştir. Ayrıca bu bölümde magnetostatik analizlerden elde edilen veriler karşılaştırılarak sunulmuş, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Son olarak sonuç bölümünde ise çalışmanın ve elde edilen sonuçların kısa bir özeti sunulmuştur.

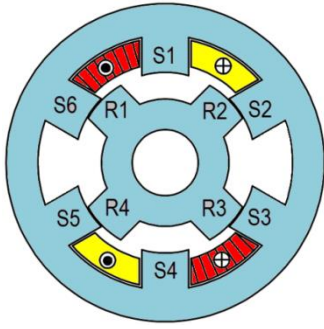
Tam Adım Sargılı ARM'lerin Genel Yapısı

ARM'ler geleneksel elektrik motorları gibi stator ve rotor'dan oluşmaktadır. Yapısal olarak adım motorlarına benzemelerine rağmen; onların aksine, daha az kutup, daha büyük adım açısı ve daha yüksek çıkış gücü kapasitesine sahiptirler [22].

ARM'lerde moment üretimi; rotor ve stator arasındaki hava boşluğuna bağlı olarak değişen relüktansa göre üretilmektedir. Uygun durumda olan faz enerjilendirildiğinde, rotor, devrenin relüktansını azaltacak yönde hareket eder. ARM'nin genel moment denklemi eşitlik 1 de verilmektedir. Burada "T" toplam momenti (Nm); "i" faz akımlarını (Amper); "L" faz endüktanslarını (Henry); "M" fazlar arasındaki karşıt endüktansı (Henry) ve "θ" rotor konum açısını (Derece) ifade etmektedir [21],[23].

$$T = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L_a}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{\partial L_b}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{\partial L_c}{\partial \theta} + i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} + i_b i_c \frac{\partial M_{bc}}{\partial \theta} + i_c i_a \frac{\partial M_{ca}}{\partial \theta} \quad (1)$$

Tam adım sargılı ARM'lerde ise moment fazlar arasında oluşan karşıt endüktans değişimine bağlı olarak üretilmektedir [23]-[25]. Bundan dolayı tam adım sargılı ARM'ler karşıt kutuplu ARM olarak da bilinmektedirler [24]. Şekil 1'de 3-fazlı, 6/4-kutuplu tam adım sargılı ARM stator-rotor yapısı görülmektedir.



Şekil 1. 3 faz 6/4 kutuplu tam adım sargılı ARM

Tam adım sargılı ARM'de, fazlar arasında karşıt endüktans elde etmek için, iki faz sargısının aynı anda enerjilendirilmesi gerekmektedir [24],[26]. Bu yüzden, tam adım sargılı ARM'de her bir faz, etkili moment üretimi için enerjilendirme periyodunun üçte ikisine katkıda bulunmaktadır [21]. Tam adım sargılı ARM'de moment denklemi, öz endüktans'lar ihmal edildiğinden, eşitlik 2'de verildiği şekli almaktadır [24].

$$T = i_a i_b \frac{\partial M_{ab}}{\partial \theta} + i_b i_c \frac{\partial M_{bc}}{\partial \theta} + i_c i_a \frac{\partial M_{ca}}{\partial \theta} \quad (2)$$

Eksenel Akılı ARM'ler

Eksenel akılı ARM'lerin manyetik hava boşluğu, Radyal-akılı ARM'lerin aksine dönme eksenine paraleldir [27]. Bu nedenle manyetik akı, radyal makinaların aksine eksenel doğrultuda akmaktadır [28]. Hava aralığı boşluğu radyal makinalarda makine uzunluğuna bağlı olarak eksenel yapılarda makine çapına bağlıdır [29]. Ayrıca, artan hava aralığı nedeniyle manyetik akı daha etkili bir şekilde kullanılmaktadır [30]. Bundan dolayı da moment yoğunluğunu arttırmak için eksenel yapılar radyal yapılara göre daha uygundur [29].

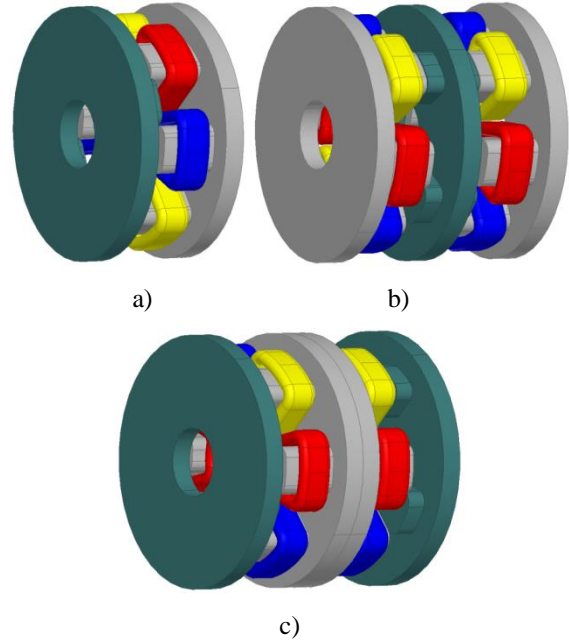
Eksenel akılı ARM geometrik açıdan genel olarak 3 ana kategoride incelenmektedir[31]. Bunlar, tek statorlu ve tek rotorlu eksenel akılı ARM, çift statorlu ve tek rotorlu eksenel akılı ARM, ve son olarak da tek statorlu ve çift rotorlu eksenel akılı ARM olarak sıralanabilirler [31]. Eksenel akılı ARM'lerde de faz sargıları radyal ARM'lerde olduğu gibi sadece statorda bulunmaktadır [32].

Tek statorlu ve tek rotorlu eksenel akılı ARM: Bu tasarımda motor, tek bir stator ve tek bir rotordan oluştuğundan dolayı tek bir hava aralığına sahiptir. Eksenel manyetik kuvvet dengesiz fakat önemlidir [31]. Şekil 2-a'da tek statorlu ve tek rotorlu eksenel akılı ARM görülmektedir.

Çift statorlu ve tek rotorlu eksenel akılı ARM: Bu tasarımda motor, iki stator ve tek bir rotordan oluşmaktadır. Bu modelin en önemli avantajı, eksenel kuvvetlerin dengeli olmasıdır. Rotor üzerindeki her statorun eksenel kuvveti, diğer statorun kuvveti ile dengelenmektedir [31]. Şekil 2-b'de çift statorlu ve tek rotorlu eksenel akılı ARM görülmektedir.

Tek statorlu ve çift rotorlu eksenel akılı ARM: Bu tasarımda motor, tek bir stator ve iki harici rotordan oluşmaktadır. Statorun ortada bulunması soğutma açısından karmaşık bir

durum yaratmaktadır [31]. Şekil 2-c'de tek statorlu ve çift rotorlu eksenel akılı ARM görülmektedir.



Şekil 2. Eksenel akılı ARM geometrik yapı modelleri a) Tek statorlu ve tek rotorlu, b) Çift statorlu ve tek rotorlu, c) Tek statorlu ve çift rotorlu [31]

Eksenel ARM ve radyal ARM eş hacimde karşılaştırıldığında maksimum endüktans eksenel yapılarda daha yüksektir [29]. Oluşan bu durum moment yoğunluğunun artmasına sebep olmaktadır [29]. Eksenel akılı ARM faz endüktansları fourier serisi kullanılarak denklem 3-6 deki gibi yazılabilirler [32],[33].

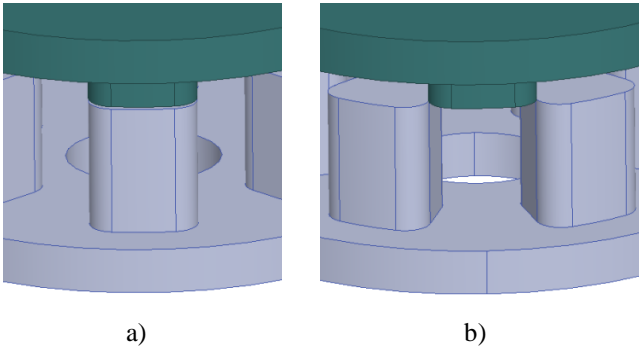
$$L(i, \theta) = L_0(i) + L_1(i) \cos(P_r \theta) + L_2(i) \cos(2P_r \theta) \quad (3)$$

$$L_0(i) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (L_a + L_u) + L_m \right] \quad (4)$$

$$L_1(i) = \frac{1}{2} (L_a - L_u) \quad (5)$$

$$L_2(i) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (L_a + L_u) - L_m \right] \quad (6)$$

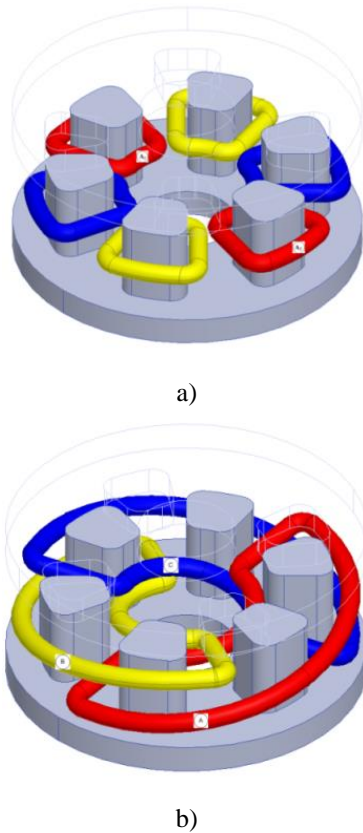
Burada " θ " rotor konumunu, " i " faz akımını, " P_r " rotor kutup sayısını, " L_a " ve " L_u " sırasıyla stator/rotor kutuplarının hizalı ve hizalanmamış durumuna göre değişen endüktans değerlerini, " L_m " ise hizalı ve hizalanmamış pozisyonların ortasındaki konumda elde edilen endüktans değerini ifade etmektedir. Şekil 3'de stator/rotor kutuplarının hizalı ve hizalanmamış durumları görülmektedir.



Şekil 3. Stator/rotor kutuplarının birbirlerine karşı durumları a) hizalı b) hizalanmamış

Eksenel akılı ARM'lerin avantajları bütün olarak değerlendirildiğinde ise, düz şekli ve yüksek boy oranıyla teker içi motor (in-wheel motor, IWMs) uygulamaları için oldukça uygun yapıdadırlar [30]. Eksenel akılı ARM'ler sahip oldukları bu fonksiyonel yapıları sayesinde, elektrikli araçlar, scooter, rüzgar türbinleri ve fan gibi uygulamalarda tercih edilmektedirler [28].

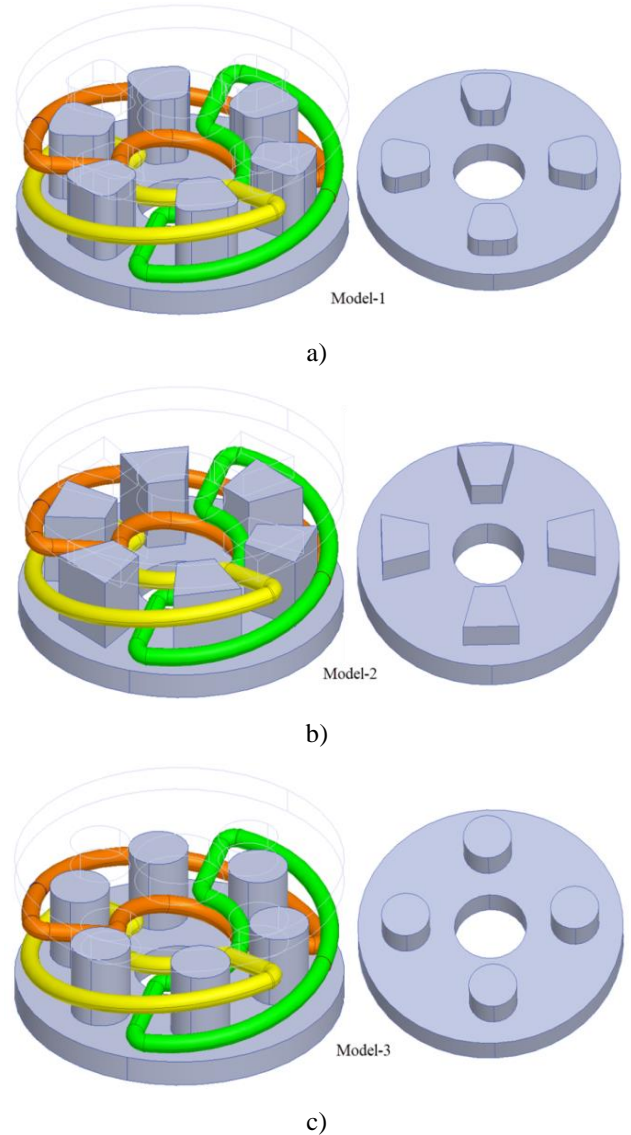
Şekil 4-a'da eksenel akılı kısa adım sargılı ARM ve Şekil 4-b'de eksenel akılı tam adım sargılı ARM geometrik yapıları görülmektedir. Sargı yapıları haricinde her iki makineye ait tüm geometrik ölçüler aynıdır. Kısa adım sargı yapısında sargılar kutup etrafına sarılırken, tam adım sargı yapısında oluklara dağılmaktadır [34].



Şekil 4. Eksenel akılı ARM a) Kısa adım sargılı, b) Tam adım sargılı [34]

Önerilen Eksenel Akılı Tam Adım Sargılı ARM Modelleri ve Magnetostatik Analizleri

Eksenel akılı tam adım sargılı ARM modellerinin stator/rotor kutup şekillerinin motor performansına etkilerinin incelenmesi amacıyla üç farklı model önerilmiştir. Bunlar, Model-1 (kavisli), Model-2 (keskin) ve de Model-3 (yuvarlak) olarak adlandırılmıştır. Her üç modelin stator/rotor kutup şekilleri haricinde geriye kalan tüm geometrik özellikleri aynıdır. Stator/rotor kutup kombinasyonu olarak da 6/4 kombinasyonu tercih edilmiştir. 6/4 kombinasyonu, ARM'deki en temel yapıdır. Bu nedenle, bu kombinasyon yeni bir türün teorik olarak değerlendirilmesi için en uygun yapıdır [29]. Şekil 5-a'da Model-1, Şekil 5-b'de Model-2, Şekil 5-c'de ise Model-3 görülmektedir. Modellere ait genel geometrik ölçüler ve nominal değerler tablo-1'de verilmektedir.



Şekil 5. 6/4 kutuplu eksenel akılı tam adım sargılı ARM modelleri a) Model-1 (kavis), b) Model-2 (uçgen), c) Model-3 (yuvarlak)

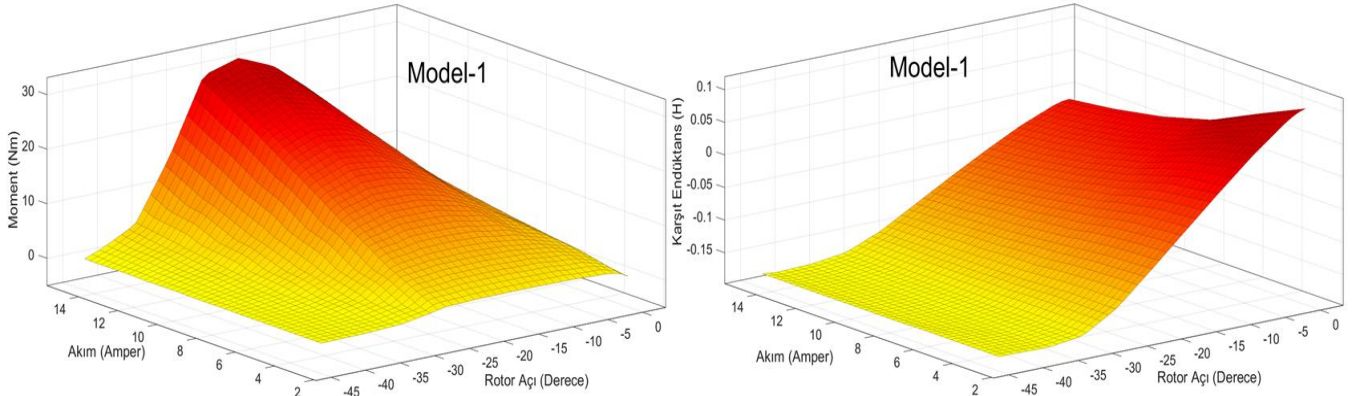
Tablo 1. Geometrik ölçüler ve nominal değerler.

Geometrik özellikler	Değer
Stator/Rotor kutup sayısı	6/4
Stator/Rotor dış çap uzunluğu (mm)	220.00
Stator boyunduruk kalınlığı (mm)	17.50
Stator dış eksenel uzunluğu (mm)	50.00
Rotor boyunduruk kalınlığı (mm)	17.50
Rotor dış eksenel uzunluğu (mm)	16.50
Hava aralığı uzunluğu (mm)	1.00
Sargı sipir sayısı	300
Anma akımı (Amper)	10
Anma gücü (Watt)	2200
Anma hızı (rpm)	1500

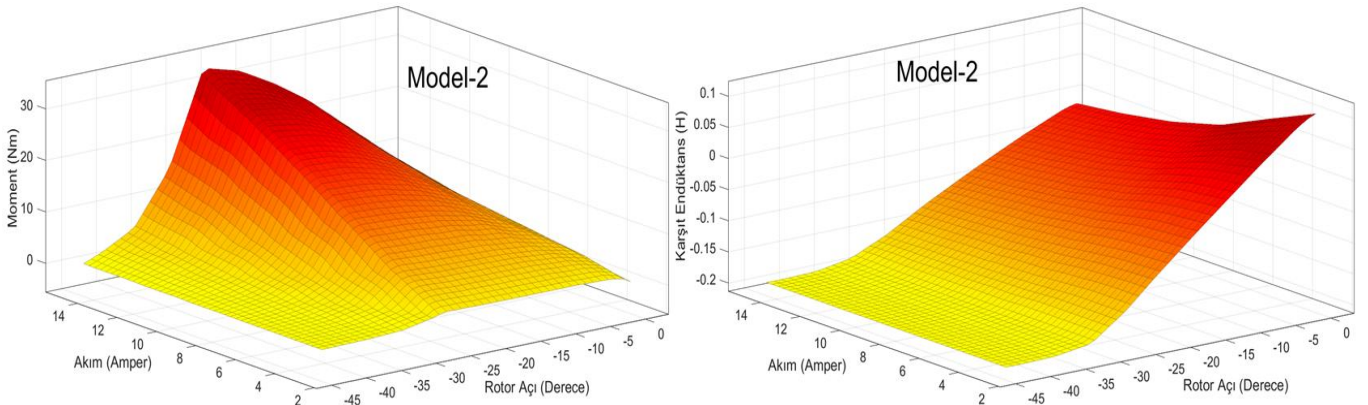
Elektrik makinalarının elektromanyetik özelliklerini incelemek amacıyla literatürde çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Uygulanan bu yöntemler genel olarak nümerik ve analitik olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Nümerik yöntemlerden elde edilen sonuçlar analitik yöntemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, daha yüksek doğrulukta olduğu görülmektedir. Bu nedenle, nümerik yöntemler kullanıcılar tarafından daha çok tercih edilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) analizi de en yaygın olarak kullanılan nümerik yöntemlerinden biridir [35]. SEY yazılımları, tasarlanacak elektrik makinalarının

davranışlarının modellenbilmesini sağlamaktadır [36]. Ayrıca, literatürde elektrik makinalarının magnetostatik analizleri 2B ve 3B olarak gerçekleştirilmektedir. 2B-SEY analiz hesaplama süresi 3B-SEY analizi hesaplama süresinden daha kısadır [37]. Fakat, hava bölgelerindeki karmaşık akı yollarından dolayı eksenel akılı makinalarının analizleri mutlaka 3B-SEY olarak gerçekleştirilmelidir [38],[39].

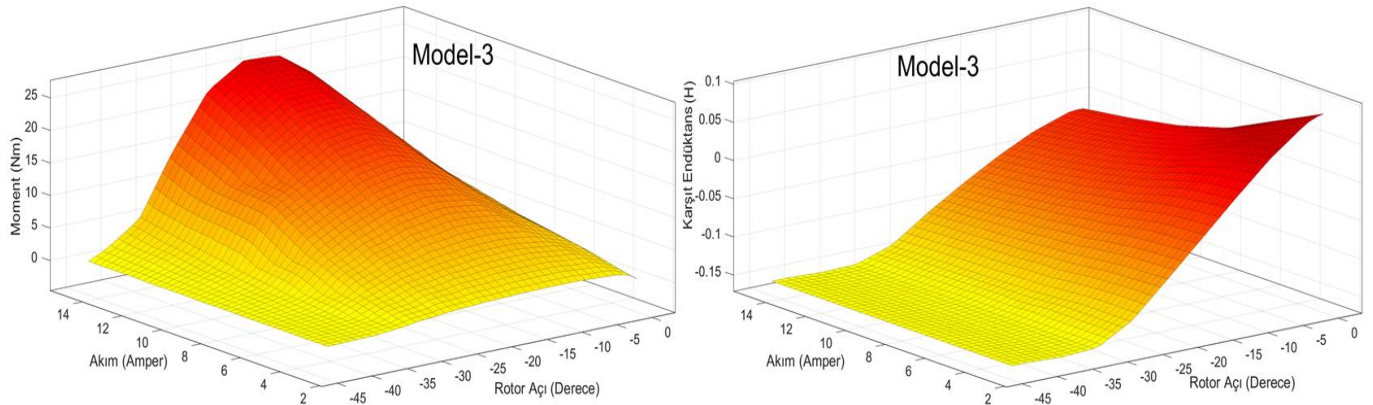
Önerilen her üç model de 2.5 Amper adımlarla 15 Amper'e kadar analiz edilmiştir. Analiz şartları her üç model içinde aynı tutulmuştur. Analizler arasındaki tek fark, önerilen modellerin stator/rotor kutup şekilleridir. Şekil 6'da her üç modelin analizlerden elde edilen açı-akım-moment ve açı-akım-karşıt endüktans değişimleri, Şekil 7'de ise her üç modelin 12.5 Amper'de elde edilen moment grafiğinin karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6'da moment ve karşıt endüktans grafikleri incelendiğinde her üç modelin de karakteristik olarak birbirine benzediği, maksimum değerlerin farklı olduğu görülmektedir. Şekil 7'de önerilen üç modelin 12.5 Amper'de elde edilen moment eğrileri ayrıntılı olarak incelendiğinde ise moment eğrilerinin kesişim noktalarının, diğer bir ifadeyle anlık moment minimum değerlerinin ($M_{ani(min)}$) birbirine yakın olduğu, anlık moment maksimum değerlerinde ($M_{ani(max)}$) ise Model-2'nin en yüksek değere ulaştığı görülmektedir.



a)

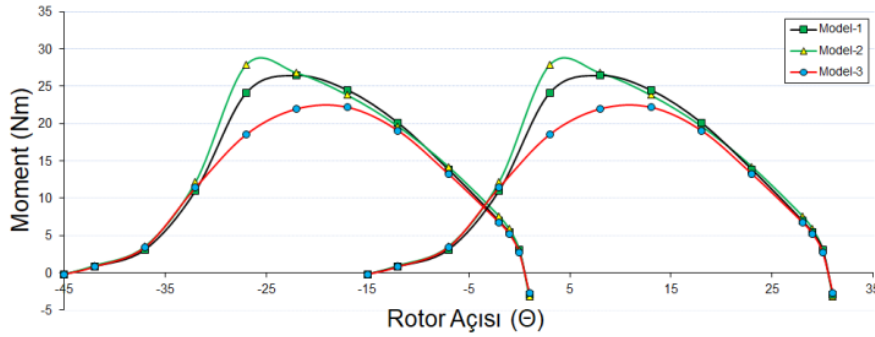


b)



c)

Şekil 6. Rotor açığı-akım-moment ve rotor açığı-akım-karşıt endüktans değişimleri a) Model-1, b) Model-2, c) Model-3



Şekil 7. Model-1, Model-2 ve Model-3'ün 12.5 Amper'de elde edilen moment eğrileri

Her üç modelin ortalama moment ve moment dalgalılıklarını karşılaştırmak için denklem 7-8 kullanılmıştır. Moment dalgalılığını (M_d) hesaplamak için anlık moment (M_{ani}) ve ortalama moment (M_{or}) tanımlanmalıdır. Kararlı durumda ortalama moment'in yüzdesi olarak ifade edilen maksimum ve minimum anlık moment arasındaki fark moment dalgalanması olarak ifade edilmektedir [21]. Denklem 7'de moment dalgalılığı, denklem 8'de ortalama moment eşitliği görülmektedir [21]. Her üç modelin magnetostatik analizlerinden elde edilen verilerden denklem 7-8

kullanılarak elde edilen karşılaştırmalı sonuçları tablo 2'de görülmektedir.

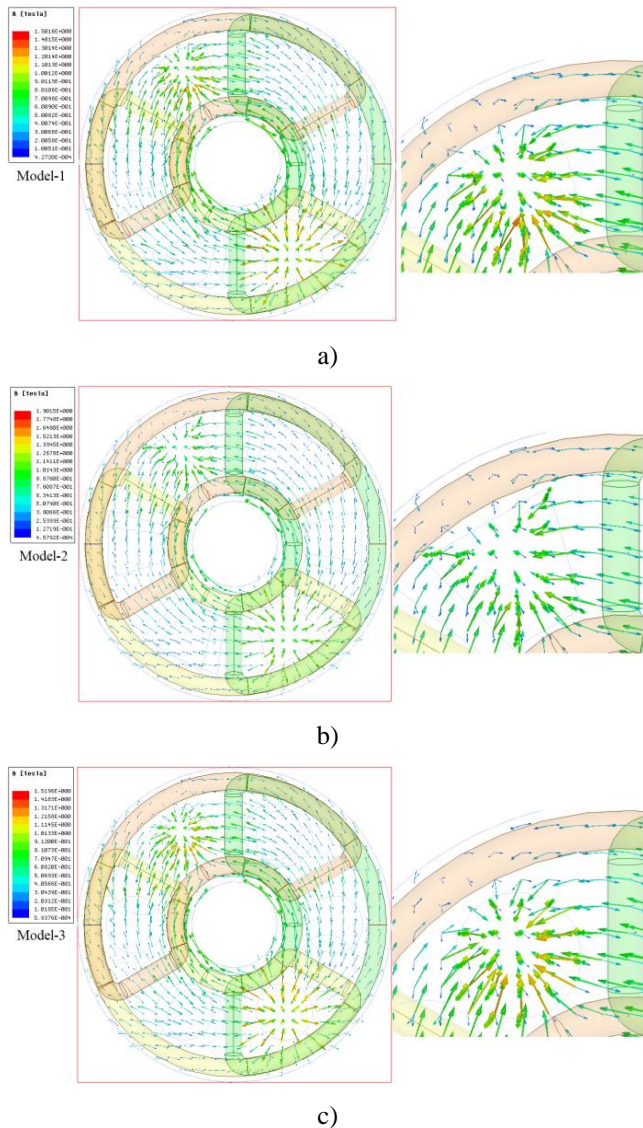
$$(M_d) = \frac{M_{ani(max)} - M_{ani(min)}}{M_{or}} \times 100 \quad (7)$$

$$M_{or} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{ani} dt \quad (8)$$

Tablo 2. Önerilen modellerin magnetostatik analiz sonuçları

Akım (Amper)	Model-1 (kavisli)		Model-2 (keskin)		Model-3 (yuvarlak)	
	M_{or} (Nm)	M_d (%)	M_{or} (Nm)	M_d (%)	M_{or} (Nm)	M_d (%)
2.5	1.29	36.64	1.39	33.29	1.22	33.31
5	4.86	41.95	5.31	39.38	4.66	34.58
7.5	9.16	48.17	9.77	46.40	8.81	37.39
10	13.52	50.90	14.24	49.25	12.72	38.88
12.5	17.65	49.73	18.72	48.70	15.52	42.93
15	21.23	47.91	22.45	49.76	18.44	42.40

Tablo 2'den verilen sonuçlar değerlendirildiğinde farklı akımlarda en düşük moment dalgalılığına Model-3'ün sahip olduğu görülmektedir. Fakat ortalama moment değerleri incelendiğinde Model-1 ve Model-2'nin Model-3'e göre daha yüksek performans sağladığı görülmektedir. Model-1 ve Model-2'nin ortalama moment değerinin yüksek olması; daha yüksek performans sağlaması, kutuplardaki alanın Model-3'e göre daha geniş olmasından kaynaklanmaktadır. Model-1 ve Model-2 kendi arasında değerlendirildiğinde ise benzer şekilde kutuplarda daha geniş bir yüzey alanına sahip olan Model-2 daha yüksek performans göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde önerilen üç model arasında Model-2 (keskin) diğer iki modele göre daha yüksek performansa sahip eksenel akıllı tam adım sargılı ARM olarak bir adım öne çıkmaktadır. Her üç modele ait akı dağılımları ise Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. 12.5 Amperde elde edilen akı dağılımları a) Model-1, b) Model-2, c) Model-3

Elektrik makinalarının tasarımında düzenli akı dağılımları oldukça önemlidir. Akı dağılımlarında oluşacak düzensizlikler, makine momentini olumsuz etkiler ve dolayısıyla da makine performansının düşmesine sebep

olmaktadır. Tam adım sargılı ARM'lerde iki faz aktif olduğundan, akı dağılımı iki faz sargısı arasında yoğunlaşmaktadır. Şekil 8'de, önerilen modellerin akı dağılımlarını daha net görebilmek için sadece üstten görünümü verilmiştir. Her üç modelin de akı dağılımlarında kaçak akı gibi olumsuz durumlar görülmektedir.

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma da magnetostatik analizlerle eksenel akıllı tam adım sargılı ARM'nin stator/rotor kutup şekillerinin makina performansına etkisi incelenmiştir. ARM'ler son yıllarda çeşitli uygulamalarda özellikle de elektrikli araç teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Yapısında doğada nadir olarak bulunan ve gelecekte hammadde bazında motor üreticilerini kaygılandıran mıknatıs bulundurmaması, ARM'leri diğer motorlardan bir adım öne çıkarmaktadır. ARM'ler de diğer elektrik makineleri gibi eksenel olarak da üretilebilmektedir. Eksenel akıllı motorlar aynı hacim ve ağırlığa sahip radyal tip motorlarla karşılaştırıldığında, birim hacim başına daha yüksek moment üretmektedirler. Eksenel akıllı motorlar özellikle teker içi motor olarak oldukça uygun yapılarıdır. Çalışmada önerilen Model-1 (kavisli), Model-2 (keskin) ve Model-3 (yuvarlak)'ün stator/rotor kutup şekilleri haricinde diğer tüm özellikleri aynı tutulmuştur. Model-2'nin kutuplarındaki geniş yüzey alanı dolayısıyla en iyi motor performansı sunduğu görülmüştür. Yapılan çalışmayla öncelikle geleneksel kısa adım sargılı ARM'lerden daha yüksek performans sağlayan tam adım sargılı ARM ve eksenel yapının bir arada kullanıldığı "eksenel akıllı tam adım sargılı ARM" nin önemini vurgulamak ve tercih edilen bir makina olmasını sağlamaktır. Ayrıca bu çalışma, eksenel akıllı tam adım sargılı ARM alanında kontrol ve geometrik yapısı üzerine çalışacaklar için de temel bir çalışma olması sağlanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi 2021-035 numaralı alt yapı projesi tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] H. Cheng, H. Chen, and Z. Yang, "Design indicators and structure optimisation of switched reluctance machine for electric vehicles," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 9, no. 4, pp. 319-331, Apr. 2015.
- [2] E. Bostanci, M. Moallem, A. Parsapour, and B. Fahimi, "Opportunities and Challenges of Switched Reluctance Motor Drives for Electric Propulsion: A Comparative Study," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 58-75, Mar. 2017.
- [3] M. Ma, Z. Chang, Y. Hu, F. Li, C. Gan, and W. Cao, "An Integrated Switched Reluctance Motor Drive Topology With Voltage-Boosting and On-Board Charging Capabilities for Plug-In Hybrid Electric

- Vehicles (PHEVs)," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1550-1559, Dec. 2018.
- [4] N. Kurihara, J. Bayless, H. Sugimoto, and A. Chiba, "Noise Reduction of Switched Reluctance Motor With High Number of Poles by Novel Simplified Current Waveform at Low Speed and Low Torque Region," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no.4, pp. 3013-3021, Apr. 2016.
- [5] J. W. Jiang, B. Bilgin, and A. Emadi, "Three-Phase 24/16 Switched Reluctance Machine for a Hybrid Electric Powertrain," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 3, no.1, pp. 76-85, Feb. 2017.
- [6] H. Wang and F. Li, "Design Consideration and Characteristic Investigation of Modular Permanent Magnet Bearingless Switched Reluctance Motor," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 67, no.6, pp. 4326-4337, July 2020.
- [7] A. Fenercioglu, M. Ş. Kurt, A. Şahin, H. Z. Keleş, and T. Kocaer, "Effect of rotor geometry on performance of 6/4 switched reluctance motors," *DUJE*, vol. 12, no. 3, pp. 459-469, June 2021.
- [8] J. Ye, B. Bilgin, and A. Emadi, "An Extended-Speed Low-Ripple Torque Control of Switched Reluctance Motor Drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 3, pp. 1457-1470, Apr. 2015.
- [9] K. Kiyota, T. Kakishima, A. Chiba, and M. A. Rahman, "Cylindrical Rotor Design for Acoustic Noise and Windage Loss Reduction in Switched Reluctance Motor for HEV Applications," *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 52, no. 1, pp. 154-162, Aug. 2016.
- [10] M. Tursini, M. Villani, G. Fabri, and L. Di Leonardo, "A switched-reluctance motor for aerospace application: Design, analysis and results," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 142, pp. 74-83, Jan. 2017.
- [11] A. Shahabi, A. Rashidi, M. Afshoon, and S. M. Saghalian Nejad, "Commutation angles adjustment in SRM drives to reduce torque ripple below the motor base speed," *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, vol. 24, no. 2, pp. 669-682, Jan. 2016.
- [12] W. Sun, Q. Li, K. Liu, and L. Li, "Design and analysis of a novel rotor-segmented axial-field switched reluctance machine," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 1, no. 3, pp. 238-245, Sep. 2017.
- [13] N. Ali, Q. Gao, C. Xu, P. Makyš, and M. Štulrajter, "Fault diagnosis and tolerant control for power converter in SRM drives," *J. Eng.*, vol. 2018, pp. 546-551, Feb. 2018.
- [14] D. Marcsa and M. Kuczmann, "Design and control for torque ripple reduction of a 3-phase switched reluctance motor," *Comput. Math. Appl.*, vol. 74, no. 1, pp. 89-95, July 2017.
- [15] H.-S. Ro, K.-G. Lee, J.-S. Lee, H.-G. Jeong, and K.-B. Lee, "Torque Ripple Minimization Scheme Using Torque Sharing Function Based Fuzzy Logic Control for a Switched Reluctance Motor," *J Electr Eng Technol*, vol. 10, no. 1, pp. 118-127, Jan. 2015.
- [16] X. Y. Ma, G. J. Li, G. W. Jewell, Z. Q. Zhu, and H. L. Zhan, "Performance Comparison of Doubly Salient Reluctance Machine Topologies Supplied by Sinewave Currents," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no.7, pp. 4086-4096, July 2016.
- [17] X. Deng, B. Mecrow, H. Wu, and R. Martin, "Design and Development of Low Torque Ripple Variable-Speed Drive System With Six-Phase Switched Reluctance Motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 33, no.1, pp. 420-429, Mar. 2018.
- [18] Q. Sun, J. Wu, C. Gan, Y. Hu, and J. Si, "OCTSF for torque ripple minimisation in SRMs," *IET Power Electron.*, vol. 9, no. 14, pp. 2741-2750, Nov. 2016.
- [19] H. Ishikawa, T. Imai, and H. Naitoh, "New Drive Circuit for Reducing the Switching Current Ripples in Switched Reluctance Motors," *Electr Eng. Jpn.*, vol. 203, no. 2, pp. 47-57, Jan. 2018.
- [20] E. Daryabeigi, M. M. Namazi, A. Emanian, A. Rashidi, and S. M. Saghalian-Nejad, "Torque ripple reduction of switched reluctance motor (SRM) drives, with emotional controller (BELBIC)," presented at the *Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Orlando, FL, USA, 5-9 Feb. 2012.
- [21] C. Sahin, A. E. Amac, M. Karacor, and A. Emadi, "Reducing torque ripple of switched reluctance machines by relocation of rotor moulding clinches," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 6, no. 9, p. 753-760, Nov. 2012.
- [22] W. Ding, Y. Hu, and L. Wu, "Analysis and Development of Novel Three-Phase Hybrid Magnetic Paths Switched Reluctance Motors Using Modular and Segmental Structures for EV Applications," *IEEE/ASME Trans. Mech.*, vol. 20, pp. 2437-2451, Jan. 2015.
- [23] B. C. Mecrow, "Fully pitched-winding switched-reluctance and stepping-motor arrangements," *IEE Proceedings B*, vol. 140, no. 1, pp. 61-70, Jan. 1993.
- [24] M. A. Kabir and I. Husain, "Design of Mutually Coupled Switched Reluctance Motors (MCSRMs) for Extended Speed Applications Using 3-Phase Standard Inverters," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 31, no.2, pp. 436-445, Dec. 2016.
- [25] J. Sun, S. Wang, Z. Kuang, and H. Wu, "Torque ripple comparison of short-pitched and fully-pitched winding switched reluctance machine," presented at the *15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sapporo, Japan, 21-24 Oct. 2012.
- [26] P. Azer, B. Bilgin, and A. Emadi, "Mutually Coupled Switched Reluctance Motor: Fundamentals, Control, Modeling, State of the Art Review and Future Trends," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 100099-100112, July 2019.
- [27] E. S. Sanches and J. A. Santisteban, "Mutual Inductances Effect on the Torque of an Axial Magnetic Flux Switched Reluctance Motor," *IEEE Lat. Am. Trans*, vol. 13, no. 7, pp. 2239-2244, July 2015.

- [28] H. Torkaman, A. Ghaheri, and A. Keyhani, "Axial flux switched reluctance machines: a comprehensive review of design and topologies," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 13, no. 3, pp. 310-321, Jan 2019.
- [29] H. Arihara and K. Akatsu, "Basic Properties of an Axial-Type Switched Reluctance Motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no.1, pp. 59-65, Jan.-Feb. 2013.
- [30] J. Ma, J. Li, H. Fang, Z. Li, Z. Liang, Z. Fu, *et al.*, "Optimal Design of an Axial-Flux Switched Reluctance Motor With Grain-Oriented Electrical Steel," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no.6, pp. 5327-5337, Nov.-Dec. 2017.
- [31] M. H. Belhadi, G. Krebs, C. Marchand, H. Hannoun, and X. Mininger, "Evaluation of axial SRM for electric vehicle application," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 148, pp. 155-161, July 2017.
- [32] R. Shiwakoti, B. Poudel, E. Amiri, M. Divandari, and A. Damaki, "Design and Analysis of Modular Axial Flux Switched Reluctance Motor," presented at the *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 12-15 May 2019.
- [33] M. J. Kermanipour and B. Ganji, "Modification in Geometric Structure of Double-Sided Axial Flux Switched Reluctance Motor for Mitigating Torque Ripple," *Can. J. Elect. Comput. E.*, vol. 38, no. 4, pp. 318-322, Fall 2015.
- [34] C. Sahin and M. Karacor, "Principle, design and analysis of a novel axial flux switched reluctance machine with fully pitched winding structure," *Electrical Engineering*, to be published DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01417-z>
- [35] R. Alipour-Sarabi, Z. Nasiri-Gheidari, and H. Oraee, "Development of a Three-Dimensional Magnetic Equivalent Circuit Model for Axial Flux Machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no.7, pp. 5758-5767, July 2020.
- [36] M. Çeçen and B. GÜMÜŞ, "Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak farklı tip sargılar için güç transformatörün 2B analiz sonuçlarının karşılaştırılması," *DUJE*, vol. 9, no. 2, pp. 701-712, Sep. 2018.
- [37] K. Kiyota, S. Nakano, and A. Chiba, "A Fast Calculation Method of Optimal Ratio of Outer Diameter and Axial Length for Torque Improvement in Switched Reluctance Motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 6, pp. 5802-5811, June 2018.
- [38] W. Sun, Q. Li, L. Sun, L. Zhu, and L. Li, "Electromagnetic Analysis on Novel Rotor-Segmented Axial-Field SRM Based on Dynamic Magnetic Equivalent Circuit," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 55, no. 6, pp. 1-5, Mar. 2019.
- [39] K. Deguchi, S. Sumita, and Y. Enomoto, "Analytical Method Applying a Mathematical Model for Axial-Gap-Switched Reluctance Motor," *Electr Eng. Jpn.*, vol. 196, no. 3, pp. 30-38, Nov. 2016.



Paralel Aktif Güç Filtresi Kullanarak Asenkron Motorun Reaktif Güç Kompanzasyonunun PSCAD ile Modellenmesi

Modeling of Reactive Power Compensation of Induction Motor with PSCAD Using Parallel Active Power Filter

Mustafa Güngör^{1*}, Mehmet Emin Asker², Muhammed Bahaddin Kurt³

¹ Mardin Artuklu Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, mustafagungor@artuklu.edu.tr, ORCID :0000-0002-2702-8877

² Dicle Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, measker@dicle.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4585-4168

³ Dicle Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, bkurt@dicle.edu.tr, ORCID:0000-0001-6983-2081

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 22 Şubat 2022
Revizyon 12 Mayıs 2022
Kabul 30 Mayıs 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar kelimeler:

Paralel aktif güç filtresi, Üç fazlı asenkron motor, Güç katsayısı düzeltme, Anlık reaktif güç teorisi

ÖZ

Bu çalışmada, üç fazlı bir asenkron (ASM) motorun üç faz-üç telli gerilim beslemeli paralel aktif güç filtresi (PAGF) yardımı ile güç katsayısının ($\cos\phi$) düzeltilmesi amaçlı PSCAD/EMTDC yazılımı kullanılarak hazırlanan bir benzetim çalışması verilmiştir. Benzetim modeli üç fazlı bir asenkron motor, üç faz-üç telli gerilim beslemeli paralel aktif güç filtresi ve AC kaynaktan oluşmaktadır. Paralel aktif güç filtresini kontrol için anlık reaktif güç teorisi tekniğini kullanarak referans akımlar üretmektedir. Fabrikalar ve işletmelerde yoğun olarak kullanılan üç fazlı asenkron motorların şebekeden anlık olarak değişen reaktif güç talepleri olmaktadır. Bu güç talepleri pasif filtrelerle düzeltilbilse de birçok olumsuz yönü de bulunmaktadır. Gerçekleştirilen benzetim çalışması ile güç katsayısının hızlı bir şekilde düzeltilbildiği gösterilmiştir. Ayrıca, yapılan benzetim çalışmasında PAGF'nin dinamik yük şartlarına cevabı oldukça iyi olduğu alınan sonuçlardan anlaşılmaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 February 2022
Received in revised form 12 May 2022
Accepted 30 May 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Parallel active power filter, Three-phase asynchronous motor, Power factor correction, Instantaneous reactive power theory

ABSTRACT

In this study, a simulation study prepared by using PSCAD/EMTDC software for the correction of the power coefficient ($\cos\phi$) of a three-phase asynchronous (ASM) motor with the help of a three-phase-three-wire voltage fed parallel active power filter (PAGF) is given. The simulation model consists of a three-phase asynchronous motor, a three-phase-three-wire voltage-supplied parallel active power filter and an AC source. It generates reference currents using the instantaneous reactive power theory technique to control the parallel active power filter. Three-phase asynchronous motors, which are used extensively in factories and businesses, have instantaneously changing reactive power demands from the network. With the simulation study, it has been shown that the power factor can be corrected quickly. In addition, it is understood from the results obtained in the simulation study that the response of PAGF to dynamic load conditions is quite good.

Doi: 10.24012/dumf.1077581

* Sorumlu Yazar

Giriş

Reaktif güç ve harmonikler şebekeyi olumsuz yönde etkileyen güç kalitesi problemlerinin en önemlilerindedir. Reaktif güç ve harmoniklerin yüksek gerilim sistemlerinde ve ağır sanayi tesislerinde kompanze edilmesi güç kalitesini arttırmak için önem arz etmektedir [1]. Aynı zamanda lineer olamayan yükler olan güç anahtarlarının kullanım alanları yaygınlaştıkça harmonikli akımlar şebeke sinyalinin kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum düşük güç faktörü, düşük verimlilik, pasif elemanların aşırı ısınması gibi farklı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Reaktif güç kompanzasyonu için bugüne kadar kullanılan yöntem pasif devre elemanları ile yapılan filtrelerdir. Ancak pasif devre elemanları ile yapılan filtrelerin şebeke empedansı ile anlık olarak rezonansa girme riski vardır ve bu çok tehlikelidir. Aynı zamanda yükün talep ettiği yüksek reaktif güçlere çıkıldığında filtrelerde kullanılan pasif elemanların ağırlıkları ve hacimleri çok büyük ölçülere ulaşabilmektedir [2].

Günümüzde bozulmuş bir yük akımının neden olduğu bu tür problemleri çözmek için etkin bir çözüm, aktif güç filtrelerinin (AGF) kullanılmasıdır. Seri, paralel ve hibrit gibi farklı yapıya sahip AGF'ler, güç kalitesi problemlerinin büyük çoğunluğuna çözüm bulabilmek için denenmekte ve iyileştirme çalışmalarını günümüzde hala devam ettirmektedir [3]. Güç anahtarlarının çok yüksek frekanslarda anahtarlama yetenekleri sayesinde AGF'in yüksek frekanslı akım ve gerilim harmoniklerini de filtreleyebilmesine, reaktif güç kompanzasyonu yapabilmesine, üç fazlı sistemlerde dengesizliğin giderilmesi ve nötr hattı akımlarının azaltılmasına olanak sağlamaktadır. Bu AGF'ler harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu için günümüzün en etkili yöntemi olarak görülmektedir [4].

Paralel aktif güç filtresi (PAGF) ASM'nin talep ettiği reaktif gücü karşılamakla birlikte asenkron motor sürücüsünün şebekede meydana getirdiği akım bozulmalarına ters yönde akım enjekte ederek cevap verebilmektedir. Bu şekilde kaynak tarafında meydana gelebilecek olumsuzluklar ortadan kaldırılmış olur [5]. Üç fazlı ASM'ler fabrikalar ve atölyelerde çok yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Şebekeden talep ettikleri reaktif güçler bazen büyük boyutlara çıkabilmektedir. Bundan dolayı ağır sanayiye sahip birçok ülkede üretilen enerjinin önemli bir yüzdesi üç fazlı asenkron motorlar tarafından tüketilmektedir [6]. Paralel aktif güç filtresi ile beraber kullanıldığında ise ASM'nin talep ettiği reaktif güç PAGF tarafından karşılanır.

Bu çalışmada PSCAD/EMTC'te hazırlanan üç fazlı bir ASM'nin üç fazlı-üç telli PAGF ile güç kompanzasyonu çalışılmıştır. PAGF doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan harmonikleri yok etmek ve reaktif güç kompanzasyonu yapmada kullanılırlar. Bu çalışmada yük olarak üç fazlı bir ASM seçilmiştir. Dolayısıyla reaktif güç kompanzasyonu hedeflenmiştir. Reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtreleme için anlık reaktif güç teorisi, akım kontrol yöntemi için ise histerezis bant akım kontrol tekniğinin kullanılmıştır. Bir ASM'nin şebekeden talep ettiği reaktif gücün başarılı bir şekilde PAGF'den karşılanabildiği gösterilmiştir.

PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) Programı

PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) dünyaca ünlü EMTDC elektromanyetik geçici simülasyon motoruna yönelik güçlü ve esnek bir grafik kullanıcı arabirimidir. PSCAD, kullanıcının şematik olarak bir devre oluşturmasını, bir simülasyon çalıştırmasını, sonuçları analiz etmesini ve verileri tamamen entegre, grafiksel bir ortamda yönetmesini sağlar. Kullanıcının bir simülasyon çalışması sırasında sistem parametrelerini değiştirmesine ve böylece simülasyon devam ederken etkileri görüntülenmesine olanak sağlar. PSCAD programı, elektrik şebekelerindeki zamana bağlı geçici olayları analiz etmek için kullanılan bir simülasyon programı olmakla birlikte, uygulamalı analizlerin zaman ve özel bilgi gerektirdiği durumlarda doğruluk ve verimlilik açısından güç elektroniği devrelerinin değerlendirilmesini yazılımsal hale getirip akıllı yöntemler ile simülasyon yapan bir yazılımdır. PSCAD aynı zamanda güç kalitesi ve özellikle geçişler ve harmonikler için test ve simülasyon imkânı sağlayan esnek ve etkili bir yazılımdır.

Aktif Güç Filtreleri

Aktif güç filtreleri, yapısında bulunan inverter ve inverterin çıkışına bağlı dc kondansatör ile bobini üzerinde üretilen gerilimi veya akımı kontrol algoritmasına bağlı bir şekilde AC kaynağa ileten güç elektroniği tabanlı devreler olarak adlandırılır. Aktif filtrelerin ilk yatırım maliyeti pasif filtrelere göre fazla olmasına rağmen; şebeke empedansı rezonans riski taşıyor olması, yüksek frekanslarda lineer olamayan yüklerin sebep olduğu harmonikleri filtrelemesi ve hacimlerinin pasif filtrelere göre küçük olması AGF'leri ile yapılan uygulamaların artmasına sebep olmaktadır [7].

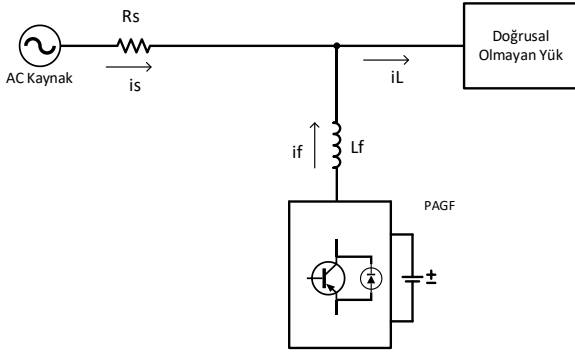
Güç elektroniği yarıiletken tabanlı devre elemanlarının kapasite ve anahtarlama frekansının gelişmesi ile birlikte, reaktif güç kompanzasyonu ve harmonikli akım filtreleme konusunda aktif güç filtreleri üzerine ilgi artmıştır. Aktif güç filtreleri uygulandığı sistemdeki akım ve gerilimdeki harmonik değişimlerine karşı filtreleme konusunda pasif filtrelere kıyasla çok daha başarılıdır. İlk yatırım maliyetleri fazla olsa da uzun dönemde enerji kalitesi ve maliyet açısından kar getirmektedirler [8].

Sistem yapılandırmasına göre aktif güç filtreleri; paralel aktif güç filtreleri, seri aktif güç filtreleri, hibrit aktif güç filtreleri, birleştirilmiş güç kalitesi düzenleyicileri olarak dört grupta toplanırlar [9].

Paralel Aktif Güç Filtreleri

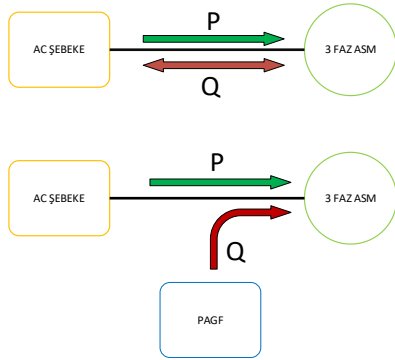
Bu benzetim çalışmasında paralel aktif güç filtresi (PAGF) kullanıldığından dolayı bu bölümde sadece PAGF'ne değinilmiştir. Literatürde PAGF'leri doğrusal olmayan yükler tarafından meydana getirilen akım bozulmalarını filtrelemek, çekilen reaktif gücü minimize etmek ve dengesiz yük sistemlerinde faz akımlarını dengelemek amacıyla kullanılmaktadırlar. Paralel aktif güç filtresi bağlandığı şebekenin yük akımını anlık olarak ölçer ve sisteme yük akımının harmonikli sinyalleri ile eşit genlikte fakat zıt yönde akım vererek 180° zıt reaktif güçle yükler [3]. Şekil 1'de gerilim beslemeli paralel aktif güç filtresi verilmiştir. Üç telli-üç fazlı PAGF'de güç devresinin kontrolü için lazım olan darbeler, yük akımının çektiği harmonikli akım ölçülüp anlık

reaktif güç teorisine göre analizi yapıldıktan sonra üretilir. Bu çalışmamızda gerilim beslemeli üçfazlı-üç telli bir PAGF kullanılmıştır.



Şekil 1. Gerilim beslemeli paralel aktif güç fitresi

Şebekeye bağlı bir ASM'nin PAGF ile beraber kullanılıp kullanılmama durumunda güç akışı Şekil 2'de gösterilmiştir. Günümüzde sürme devreleri ile kontrol uygulamaları artan ASM'ler şebekeden reaktif güç talep etmekle birlikte harmonik akımlarda çekerek sinyal kalitesini bozabilmektedirler.



Şekil 2. Aktif Güç Filtresinin devrede olduğu ve olmadığı durum

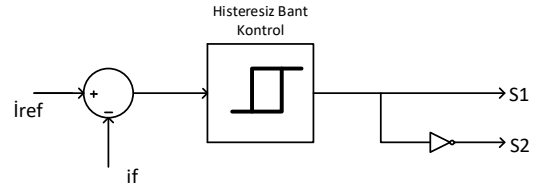
Paralel aktif güç filtresinde kontrol

PAGF'nin kontrolü sadece harmoniklerin kompanzasyonu durumunda değil aynı zamanda çalışabileceği gücü içinde önem arz etmektedir. PAGF'nin kararlı durumdaki verimli çalışması kadar geçici durumlardaki davranışı aktif güç filtresinin kontrol yöntemi için oldukça önemlidir [10]. AGF'ler kontrol tekniklerine göre; zaman domeni teknikleri ve frekans domeni tekniği olarak ikiye ayrılır. Kontrol tekniğine ileride ayrıntılı bir şekilde değinilecektir.

Histerezis bant akım kontrol tekniği

Bu çalışmada, kontrol yöntemi olarak Histerezis Bant Akım Kontrol Tekniği (HBAT) kullanılarak anahtarlama sinyalleri elde edilmiştir. HBAT gerilim kaynaklı aktif güç filtresinin çoğu uygulamalarında anahtarlama sinyalleri üretmek için etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Anahtarlama sinyalleri üretmek için referans akımı (i_{ref}) ile gerçek akımının (i_f) bir histerezis bandında birleştirildiği bir kontrol tekniğidir. Simülasyonda kullanılan evirici çıkışındaki akımı kontrol etmek için çıkış akımları ve referans akımları karşılaştırılır ve elde edilen hata sinyalleri, anahtarlama sinyalleri üretmek için histerezis kontrolörlerine uygulanır [11]. Üretilen hata sinyali belirlediğimiz histerezis bandının üst sınırına

ulaştığında S2 anahtarı devreye girer ve akımı azaltır. Aynı şekilde hata sinyali histerezis bandının alt sınırına ulaştığında ise S1 anahtarı devreye girer ve akım değeri artırır. Hata sinyallerini üretmek için kullandığımız histerezis bant akım kontrol blok şeması Şekil 3'de verilmiştir [12].



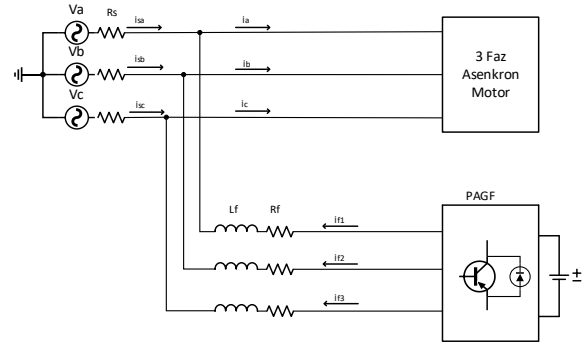
Şekil 3. Histerezis akım kontrol tekniği

Sistem yapısına göre AGF sınıflandırması

AGF'lerde sınıflandırma yapılırken öncelikle şebekenin tek fazlı veya üç fazlı olmasına göre sınıflandırma yapılır. Daha sonra üç fazlı sistemlerde AGF'ler üç fazlı-üç telli veya üç fazlı-dört telli olmasına göre yapılandırılabilir. Bu çalışmamızda olduğu gibi bazı uygulamalarda üç fazlı doğrusal olmayan yükler nötrüz olarak üç telli sistemler olarak yapılandırılır. Üç fazlı dört telli sistemler üzerinden beslenen birçok tek fazlı doğrusal olmayan yük olabilmektedir. Bundan dolayı AGF'ler iki telli, üç telli, dört telli olmak üzere üç şekilde sınıflandırılırlar [13].

Üç telli aktif güç filtresleri

Üç telli AGF'ler üç fazlı üç telli doğrusal olmayan ve reaktif güç çeken yüklerin beslenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yapıdır. Şekil 4'de verilen yapı üç fazlı-üç telli aktif güç filtreslerinde kullanılan bir yapıdır.



Şekil 4. Üç faz üç telli AGF genel blok şeması

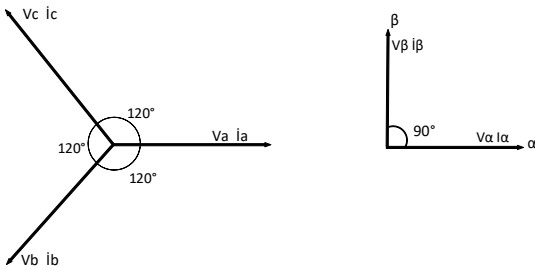
Referans akım üretme

Referans akım harmonikli akımları söndürmek ve güç katsayısını düzeltmek amacıyla AGF'nin şebekeye vermesi gereken akımın hesaplanmasında kullanılır. AGF'nin ihtiyaç duyduğu harmonikli akımı dinamik bir şekilde üretebilmesi için, doğru ve hızlı bir referans akım üretme metodu kullanmak önemlidir.

Referans akım tahmin teknikleri literatürde zaman ve frekans domeni kontrolü olarak iki kategoride incelenmektedir. Frekans domeniindeki referans akım üretme kontrol yöntemi, harmonikli akım sinyallerinin fourier analizine dayanır. Frekans domeni yöntemi genel olarak; klasik fourier ve hızlı fourier dönüşümü algoritmaları, sinüs çarpma tekniği ve modifiye fourier serileri teknikleri şeklindedir. AGF'nin zaman alanındaki kontrol yöntemleri ise; kompanzasyon için

lazım olan referans akımın anlık olarak üretilmesine dayanmaktadır. Zaman domenii yöntemi genel olarak literatürde; sabit aktif güç algoritması, sabit güç faktörü algoritması, DQ yöntemi, anlık reaktif güç kontrol yöntemi (p-q), ve senkron akı algılama yöntemleridir[14].

Bu çalışmadaki referans akım üretme yöntemi, harmonikli ve reaktif güç çeken yüklerin gerilim veya akım değerlerinin anlık olarak ölçülüp, harmonikli akımı ve gerilimi söndürmek için zıt yönde akım veya gerilimin elde edilmesi dayanır. Anlık reaktif güç teorisi Akagi tarafından 1983 yılında öne sürülmüştür. Bu teoride göre istenen reaktif güç, gerilim ve akımlar anlık olarak ölçülüp elde edilen değerlere göre hesaplamalar yapılır. Anlık reaktif güç teorisi hesaplamaları için, öncelikle üç fazlı akım ve gerilim değerlerinin Clarke dönüşümü yapılarak akımlar ve gerilimler iki fazlı durağan yapıya dönüşümü sağlanır. Şekil 5’de görüleceği gibi a, b, c düzlemindeki üç fazlı akım ve gerilim değerlerinin uzay vektörleriyle gösterimi ve bu akım ve gerilimlerin α - β durağan yapıdaki dönüşümleri gözükmemektedir. Bilindiği üzere üç fazlı sistemdeki akım ve gerilimler 120° açı farkıyla üretildikleri için düzlem üzerine birbirine 120° açılı üç vektör şeklinde gösterilmiş [15].



Şekil 5. Üç fazlı abc sistemden iki fazlı β - α sisteme dönüşüm

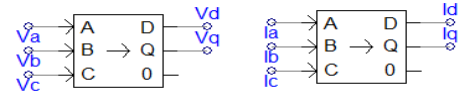
Zaman domeninde çalışma, frekans domenindeki çalışmaya göre birçok üstünlüklere sahiptir. Bunlar arasında zaman domenii yönteminin cevap hızının frekans domenine göre yüksek olması söylenebilir. Bununla birlikte zaman domeninde uygulama ve hesaplamalar daha kolaydır. Zaman domenii tekniğinin hızlı cevap yeteneği ve harmonikleri bastırmada iyi olması zaman domenii tekniğinin frekans domenii tekniğine göre çok daha üstün hale gelmesine sebep olmuştur [16].

Zaman domeninde anlık reaktif güç kontrol yöntemi (p-q)

Bu çalışmada kontrol yöntemi olarak zaman domeninde anlık reaktif güç teorisi kullanılmıştır. Anlık reaktif güç teorisi yöntemi (p-q), a b c koordinatlarındaki 3 fazlı sistem gerilimlerinin (V_a, V_b, V_c) ve yük akımlarının (I_a, I_b, I_c) denklem (1) ve (2) kullanılarak α - β koordinatlarına Clarke dönüşümü yapılarak elde edilir. Bu dönüşüm PSCAD ile yapılan blok şeması Şekil 6’de ile gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

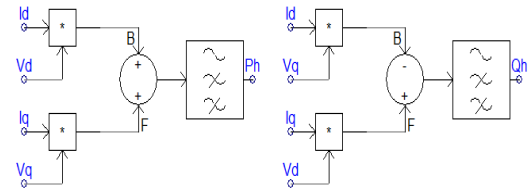


Şekil 6. Üç fazlı abc sistemden durağan dq dönüşümü için PSCAD modelleri

Dönüşümler yapıldıktan sonra, aktif gücün anlık gerçek değeri “p” ve reaktif gücün anlık değeri “q” nun hesabı denklem (3) de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

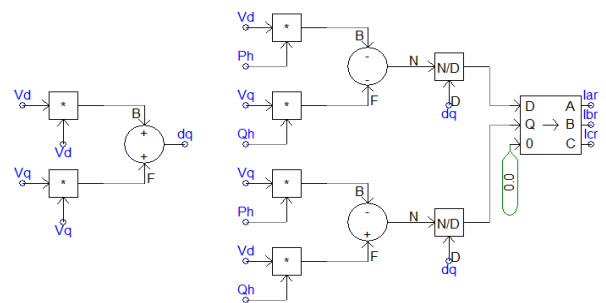
Aktif ve reaktif gücün her biri sürekli ve değişken değerlerden oluşur. Sürekli olarak değişen bu değerler, temel akım ve gerilimleri PAGF’nin şebekeye vermesi gereken kompanzasyon akımlarını hesaplamak için istenmeyen güç olarak adlandırdığımız Ph ve Qh ile gösterilen bileşenlerden ayırmak gerekir. Şekil 7’te gösterildiği gibi, istenen güç bileşenlerini temel akım ve gerilimden ayırmak için bir yüksek geçiren filtreler (YGF) kullanılmıştır.



Şekil 7. Anlık istenmeyen güç bileşenlerinin filtrelenmesi için YGH filtre PSCAD modelleri

İstenmeyen güç bileşenleri daha sonra denklem (4) kullanılarak α - β koordinatlarındaki kompanzasyon akımlarını belirlemek için kullanılmıştır. Bu durum Şekil 8’te gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_h \\ q_h \end{bmatrix} \quad (4)$$



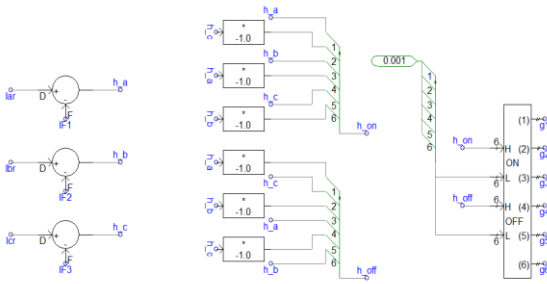
Şekil 8. Referans akımlar ($I_{ar} I_{br} I_{cr}$) için PSCAD modelleri

a, b, c koordinatlarındaki $[I_{ar}, I_{br}, I_{cr}]$ referans kompanzasyon akımları daha sonra denklem (5)'te gösterildiği gibi α - β koordinatlarındaki akımları ters Clarke dönüşümü uygulanarak hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\beta r} \\ I_{\alpha r} \end{bmatrix} \quad (5)$$

PAGF için anahtarlama sinyallerinin üretimi

PAGF'si bir inverterden oluşmaktadır. Bu inverterin kontrolü için gerekli olan anahtarlama sinyalleri (PWM) için farklı modülasyon yöntemleri kullanılabilir. Bu çalışmada anahtarlama sinyalleri üretmek için histerezis akım kontrollü modülasyon tekniği kullanılmıştır. PAGF'nin anahtarlarına aktif güç değişimlerine bağlı olarak uygulanması gereken darbeleri üretmek için gerçek filtre akımları $[IF1, IF2, IF3]$ ve referans kompanzasyon akımları $[I_{ar}, I_{br}, I_{cr}]$ arasındaki farktan faydalanılır. Bu fark hata akımı olarak adlandırılır. Hata akımı bir histerezis kontrolör yardımıyla anahtarların iletim sırasına bağlı olarak, PAGF anahtarlarını açmak ve kapatmak için gerekli olan anahtarlama sinyallerini (PWM) hesaplamak için kullanılır. Hesaplanan bu hata akımlarının üretildiği PSCAD blokları Şekil 9 gösterilmiştir.



Şekil 9. PAGF referans akımlar kullanılarak anahtarlama sinyallerinin üretimi

Sonuçlar ve Tartışma

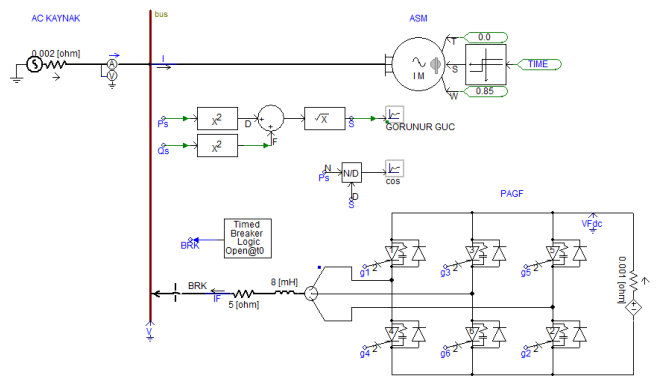
Benzetim çalışmasında üç fazlı üç telli PAGF ile üç fazlı bir ASM'nin reaktif güç kompanzasyonunun gerçekleştirilmesi için PSCAD/EMTDC paket programı kullanılmıştır. Bu çalışmada öncelikle, üç fazlı üç telli paralel aktif güç filtresinin genel yapısı incelenip, reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtreleme için en uygun referans akım bulma ve kontrol yöntemi olarak p-q teorisi olarak bilinen Akagi tarafından öne sürülen anlık reaktif güç teorisi kullanılmıştır. Akım kontrol yöntemi için ise histerezis bant akım kontrol tekniğinin kullanılmıştır. Şekil 10'da PSCAD/EMTDC'te hazırlanan üç fazlı bir ASM'nin üç fazlı-üç telli PAGF ile güç kompanzasyonunun blok şeması gösterilmiştir. Sistemde kullanılan PAGF asenkron motora paralel bağlanmış olup PAGF istenilen bir zamanda devreye alınabilmesi için bir anahtar üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Kullanılan üç fazlı ASM ve üç fa-üç telli fazlı PAGF simülasyon çalışmalarında uyum içerisinde çalışmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 11 ile Şekil 17 arasında verilmiştir. Tablo 1'de PSCAD'te kullanılan üç fazlı asenkron motor ve üç telli paralel aktif

filtresinin bazı önemli görülen parametre değerleri verilmiştir.

Tablo 1: Simülasyonda Kullanılan Parametreler

AC Kaynak Parametreleri	
Temel Kaynak Gerilim	380V
Temel Görünür Güç	20kVA
Temel Frekans	50Hz
Kaynak Direnci	0.002Ω
PAGF Parametreleri	
Filtre Hat Endüktansı	8mH
Filtre Hat Direnci	5 Ω
Filtre DC Tarafı Gerilimi (DC)	1.2kV
ASM Parametreleri	
RMS Faz Gerilimi	380V
ASM Gücü	7.46 kW
Stator Direnci	0.066 [pu]
Stator Doymamış Kaçak Reaktansı	0.046 [pu]
Rotor Doymamış Kaçak Reaktansı	0.122 [pu]
Doymamış Mıknatıslanma Reaktansı	3.86 [pu]
Kutup Sayısı	4
Seçilen Yüzde Kayma	% 15

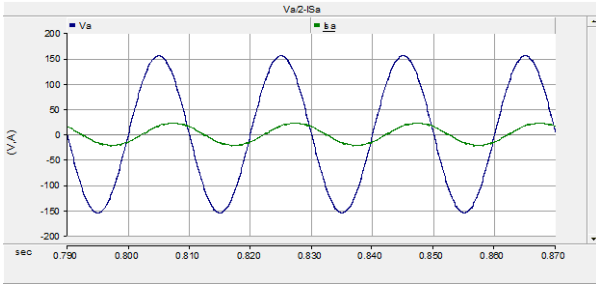
Benzetim çalışmasında sonuçlar elde edilirken %15'lik kayma değerleri ile sonuçlar elde edilmiştir. Asenkron motordaki farklı kayma değerleri, rotor devrinin yükte birlikte değişmesi anlamına gelmektedir. Benzetim çalışmasında üç fazlı asenkron motor ilk kalkınma anında atalet momenti ile çalıştırılmış, belirli bir süre sonra yük devreye alınmıştır. Asenkron motor çalıştırıldığı kayma değerindeki hızına ulaştıktan sonra ve geçici durum bittikten sonra PAGF bir anahtar üzerinden ASM'ye paralel bağlanmıştır. Bu şekildeki bir çalışma ile PAGF bağlı değilken ve bağlandıktan sonra; akım, güç ve güç katsayısının değişimleri ayrıntılı bir şekilde gözlemlenebilmiştir.



Şekil 10: Benzetim çalışmasının genel blok şeması

PAGF aktif olmadığı durumda kaynaktan çektiği akım Şekil 11'de verilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi kaynaktan çektiği akım gerilimden geride kalmaktadır. Diğer bir ifade ile üç fazlı ASM kaynaktan aktif güç ile birlikte reaktif güçte çekmektedir. ASM yüksüz durumdayken genel olarak %3-%5'lik bir kayma değeri ile çalışırlar ve yaklaşık olarak aktif gücün iki-üç katına kadar şebekeden reaktif güç talep ederler.

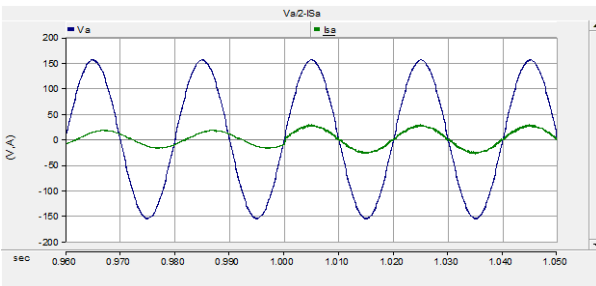
Yani güç katsayısı sıfıra yakın bir değerdedir. ASM'ye yük bağlandığı zaman kayma değeri ile birlikte kaynaktan çekilen aktif güç artmakta ve çekilen reaktif güç ise aktif güce oranla daha az artmaktadır.



Şekil 11: PAGF devrede değilken a fazını gerilim ve akımları

Reaktif güçten kaynaklı sıfıra yakın güç katsayısının 1'e yaklaştırılabilmesi için yapılması gereken, reaktif gücü meydana getiren harmonikli akımla aynı büyüklükte fakat zıt yönde reaktif gücü kaynağa uygulamaktır. Asenkron motorun yük değeri değiştikçe kaynaktan çekilen reaktif güç değeri de değişmektedir. Benzer şekilde fabrika veya işletmelerde onlarca ASM'nin sürücü devresi ile birlikte kullanıldığı uygulamalarda reaktif güçteki bu anlık değişimler pasif filtreler ile kontrol edilemez bir hal almaktadır. Bundan dolayı pasif filtreler yapılan kompanzasyonlar tam olarak ihtiyaç duyulan reaktif güce karşılık veremezler. PAGF'ler ise ihtiyaç duyulan harmonikli akıma geniş aralıklarda hızlı ve aktif cevap verebilmektedir. Yapılan bu benzetim çalışmasında bu sonuca ulaşılabilmektedir.

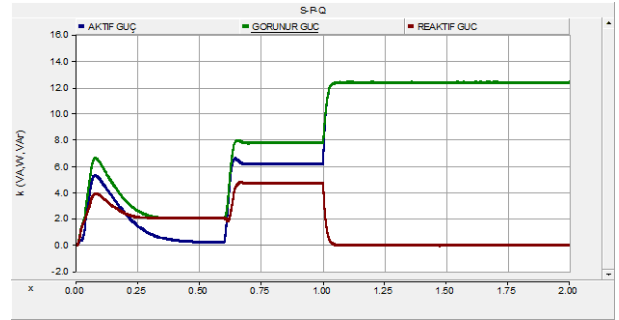
Bu benzetim çalışmada elde edilen sonuçlar %15'lik kayma değerine gerçekleşmiştir. Benzetimde seçilmiş bu kayma değeri genel olarak bir ASM'nin çalışma aralıklarına yakın değeri olup, gerçek uygulama koşullarını ifade etmektedir. ASM %15'lik bir kayma ile çalışırken kaynak akımı ve kaynak gerilimi Şekil 12'deki gibi olmaktadır. İlk kalkınma anında asenkron motor boşta çalıştırılmış olup daha sonra ise %15'lik kayma hızında çalışacak şekilde yüklenmiştir. Asenkron motor geçici durumdan çıktıktan sonra 1'ci saniyede PAGF aktif hale gelmekte ve a fazı akımı (I_a) ile gerilimi (V_a) arasındaki faz farkı çok kısa süre içerisinde sıfır olmaktadır.



Şekil 12: Kayma %15 iken a fazının gerilim ve akım durumu

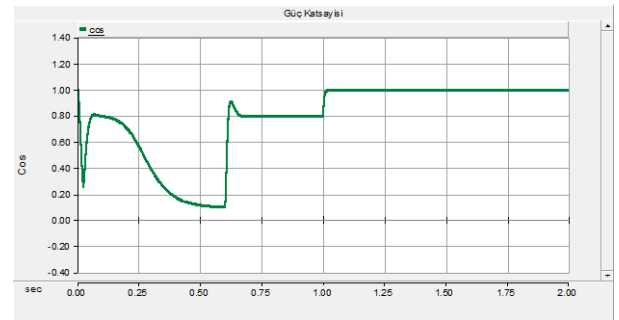
A fazının gerilimi ve akımı arasındaki faz açısının sıfır olması ile çekilen reaktif güç sıfır olmaktadır. Bu durum Şekil 13'de görülmektedir. Aynı zamanda şekilde görüldüğü gibi kaynaktan çekilen reaktif güç ise 4.7kVAr'dan çok kısa bir sürede sıfır seviyelerine düşmektedir. Aktif güç ise 7.8kW

seviyelerinden yaklaşık olarak 12kW seviyelerine çıkmıştır. Bunun sebebi görünür güç(S), aktif ve reaktif güçlerin vektörel toplamı olmasıdır. Yani reaktif güç sıfıra yaklaştıkça ASM'nin çektiği aktif güç görünür güce eşit olmakta ve yükselmektedir.



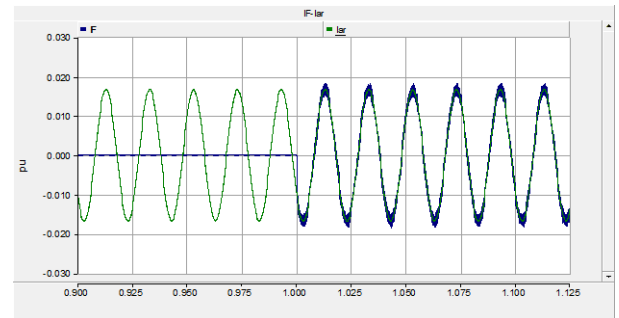
Şekil 13: Kayma %15 iken Aktif-Reaktif-Görünür güç durumu

Çekilen reaktif gücün bir göstergesi olan güç katsayısı(cosφ) ise Şekil 14'de gösterildiği gibi ASM boşta ilk çalışmaya başladıktan sonra 0.1 seviyelerine yaklaşmış ve daha sonra asenkron motor yüklenip geçici duruma sona erdikten sonra 0.8 seviyelerine çıkmıştır. PAGF 1'ci saniyede devreye alındığında ise 0.025 saniye gibi çok kısa bir sürede güç katsayısı 1'e yaklaşmaktadır.



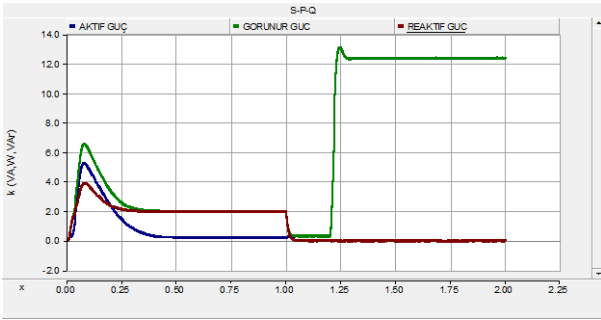
Şekil 14: Kayma %15 iken güç katsayısının durumu

ASM'nin %15 kayma ile çalışırken kompanzasyon ve harmonik filtreleme için gerekli referans akım ve PAGF akımları Şekil 15'de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi PAGF pasif durumdayken filtre akımı 0A'dır. Daha sonra 1'ci saniyede PAGF devreye alındığında filtre akımı hesaplanan referans akımın üzerine binmekte ve referans akımı takip etmektedir.



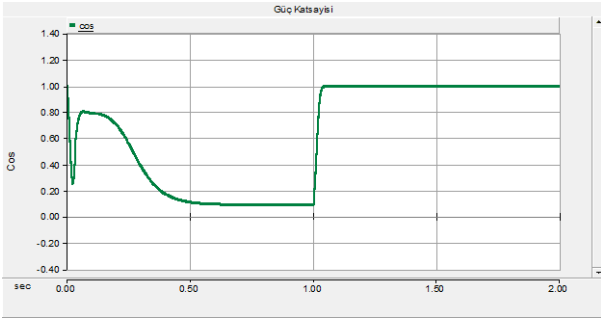
Şekil 15: PAGF'nin akımının üretilen referans akımı takip etmesi

Asenkron motor atalet momenti ile çalıştırılıp PAGF'nin devreye alındığı senaryo Şekil 16'da görülmektedir. Şekilden anlaşılacağı gibi PAGF'i asenkron motor yüksüz halden yüklü hale geçtiği durumda dahi çok hızlı bir şekilde anlık reaktif güç talep değişimine cevap verebilmektedir. Yani ilk olarak motor boşta çalışmaya başlayıp sonra 1'ci saniyede PAGF devreye alınıyor. Bu durumda çekilen reaktif güç 2kVAr seviyelerinde iken, aktif güç 2kW seviyelerindedir. Daha sonra PAGF devreye alındığında reaktif güç sıfır seviyelerine düşmektedir. ASM %15 kaymada çalışacak şekilde yüklendiği anda ise aktif güç 12.4KW seviyelerine yükselmekte ama reaktif güç sıfır seviyelerindeki durumunu koruduğu görülmektedir.



Şekil 16: PAGF devre iken ASM nin yüklü duruma geçmesi durumunda aktif, reaktif ve görünür güç

Güç katsayısı ise Şekil 17'de gözüktüğü gibi ASM boşta çalıştırılıp geçici durum bittikten sonra 0.1 seviyelerinde iken 1'ci saniyede 1'ya yaklaşmaktadır. ASM %15 kayma ile yüklendiği anda ise güç kat sayısı 1 seviyelerindeki durumunu koruduğu görülmektedir.



Şekil 17: PAGF devre iken ASM nin yüklü duruma geçmesi durumunda güç katsayısı

Sonuç

Bu benzetim çalışmasında üç fazlı bir asenkron motorun reaktif güç kompanzasyonu için PSCAD paket programındaki ASM modeli kullanılmıştır. Elde edilen ölçüm verileri değerlendirildiğinde, ASM'nin şebekeden talep ettiği reaktif güç, başarılı bir şekilde PAGF'den karşılanabildiği gösterilmiştir. İlk senaryoda PAGF kaynağa bağlanmadan önce ASM'nin geçici çalışma durumundan çıkılması beklenmekte ve değerler nominal hale geldikten sonra devreye alınması için bir anahtar kullanılmıştır. Bu amaçla anahtar devreye girmeden önce ASM'nin nominal çalışma değerlerine ulaşmasına izin verilmiştir. Aktif filtre şebekeye bağlandıktan yaklaşık 0.025 saniye sonra şebekeden karşılan

reaktif güç aktif filtreden karşılanmaya başlamıştır. Seçilen %15'lik kayma değerinde, reaktif güç kompanzasyonu benzetim çalışmasında başarılı bir şekilde yapıldığı gözlenmiştir. ASM kendi atalet momenti üzerinden çalışırken çekilen reaktif gücün yaklaşık olarak aktif güce eşit olduğu, daha sonra ASM yüklenince yani kayma değeri %15 olunca kaynaktan çekilen reaktif gücün aktif güç ile beraber arttığı ama aktif gücün daha çok arttığı gözlemlenmiştir. Daha sonra PAGF'nin reaktif güce karşı dinamik tepkisinin başarılı olduğu sonucu grafiklerinden çıkarılabilmektedir. İkinci senaryoda ise ASM yüklenmeden önce PAGF devreye alınmıştır. PAGF aktif durumdayken ASM yüklendiği anda reaktif gücün sıfır seviyelerindeki durumunu koruduğu sonuçlardan gözlenmiştir. Sonuç olarak PAGF ile ASM'in ihtiyaç duyduğu reaktif gücü ister boş çalışmada ister yüklü çalışmada veya boş çalışmadan yüklü çalışma duruma geçişlerde hızlı bir şekilde karşılayabildiği sonuçlardan gözlemlenebilmektedir.

Kaynaklar

- [1]E. Özdemir, Ş. Özdemir, M. Kale, "Aktif Güç Filtresi ile Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu", ELECO Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendis Sempozyumu, 2002, 135-139.
- [2]J. C. Das, "Passive filters-potentialities and limitations", IEEE Trans. On Indst. Appl., 40 (1): 232-241, 2004.
- [3]M. El-Habrouk, M.K. Darwish, P. Mehta, "Active Power Filters: A Review", IEEE Proc. Electric Power Appl., 147(5): 403-413, 2000.
- [4]M. Gedikpınar, M. Güngör, "Bir-Fazlı İndüksiyon Motorlar İçin Paralel Aktif Güç Filtresi Tabanlı Reaktif Güç Kompanzasyonu", Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 29 (2), 185-193, 2017.
- [5]N. F. Adan, and D. M. Soomro Articles, "A hybrid filter to mitigate harmonics caused by nonlinear load and resonance caused by power factor correction capacitor", AIP Conference Proceedings 1788, 030118, 2017.
- [6]Ö. Ali Karaman, A. Gündoğdu, and M. Cebeci, "Performing reactive power compensation of three-phase induction motor by using parallel active power filter", International Advanced Researches and Engineering Journal 04(03): 239-248, 2020.
- [7]O. Kaplan, "Bir fazlı paralel aktif güç filtreleri için sensörsüz da gerilim kontrolü", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [8]T. L. Skvarenina, "The Power Electronics Handbook", CRC Press, 477-478, 2002.
- [9]V. F. Pires, J.F.A. Silva, "Teaching Nonlinear Modeling, Simulation, and Control of Electronic Power Converters Using MATLAB/SIMULINK", IEEE Transactions on Education, 45 (3): 253-261, 2002.
- [10]L. Benchaita, S. Saadate, A. Salemnia, "A Comparison of voltage source shunt active power filter by simulation and experimentation", IEEE Trans. Power Electronics, 14(2): 642-647, 1999.

- [11]Karaman, Ö. A., Erken, F., & Cebeci, M. (2018). Decreasing harmonics via three phase parallel active power filter using online adaptive harmonic injection algorithm. *Tehnički vjesnik*, 25(Supplement 1), 157-164.
- [12]Mustafa Güngör, Paralel Aktif Güç Filtresi ile Bir Fazlı Asenkron Motorun Reaktif Güç Kompanzasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniv. Fenbilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [13]Selin ÖZÇİRA, “Aktif Güç Filtre Tipinin Kompanze Edilmesi Gereken Büyüklüğe Göre Belirlenmesi”, *GU J Sci, Part C*, 6(3): 691-704, 2018.
- [14]SARIBULUT, L., Ahmet, T. E. K. E., Meral, M., & Tumay, M. (2011). Active power filter: review of converter topologies and control strategies. *Gazi university journal of science*, 24(2), 283-289.
- [15]H. Akagi, “Instantaneous Power Theory Ders Notları, Tokyo Institute of Technology”, Tokyo, Fall 2010.
- [16]D. Chen, S. Xie, “Review of the Control Strategies Applied to Active Power Filters”, *IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, April, Hong, 2004.



Comparison of hybrid and non-hybrid models in short-term predictions on time series in the R development environment

Zeydin Pala^{1,*}, İbrahim Halil ÜNLÜK²

¹ Muş Alparslan University, Engineering Faculty, Department of Software Eng., Muş, Türkiye, <https://orcid.org/0000-0002-2642-7788>

² Muş Alparslan University, V. S. of Tech. Sci. Dept. of Electronics and Automation, Muş, Türkiye, <https://orcid.org/0000-0002-6541-2714>

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 February 2022
Received in revised form 26 May 2022
Accepted 2 June
Available online 28 June 2022

Keywords:

Time series analysis, short-term prediction, hybrid models, non-hybrid models

ABSTRACT

A single linear or nonlinear model may be insufficient to model and predict time series, as many time series often contain both linear and nonlinear components. Therefore, estimation results are tried to be improved by using collaborative models in time series short-term prediction processes. In this study, the performances of both stand-alone models and models whose different combinations can be used in a hybrid environment are compared. The mean absolute percentage error (MAPE) metric values obtained from two different categories were evaluated. In addition, the estimation performances of three different approaches such as equi-weighted (EW), variable-weighted (VW) and cross-validation-weighted (CVW) for hybrid operation were also compared.

The findings on the container throughput forecast of the Airpassengers dataset reveal that the hybrid model's forecasts outperform the non-combined model.

Doi: 10.24012/dumf.1079230

* Corresponding author

Introduction

Time series modeling and forecasting are extremely important in a wide range of practical applications. In the literature, several key models have been presented to improve the accuracy and efficiency of time series modeling and forecasting. Time series data and analytics are becoming increasingly important due to the massive generation of such data, for example, through the internet of things, the digitization of healthcare and the rise of smart cities.

In order to increase the quality of the prediction, it is a better approach to make predictions with combinations of some models instead of using the models alone. Such approaches can simultaneously handle features of a time series, such as trend and seasonality, but it is not always easy for estimators to choose the best model among those proposed. Time series can often be of different nature and the effects of external factors may differ from one model to another. Choosing the most appropriate model for forecasting purposes requires extensive experience in forecasting and time series nature as well as qualitative experience.

In many scientific studies, it is accepted that no single technique is better predictive than a combination of some techniques [1]. Collective learning is a special machine learning topic. It is an attempt to combine multiple models to provide overall higher accuracy and stable model performance. Historically, ensemble methodology is based on very strong theory and its use has been used successfully in complex data science scenarios [2]. Ensemble techniques emerge as model output collection techniques that have developed in the field of statistical and machine learning in the last decade.

None of the popular machine learning algorithms are built for time series prediction, and time series data needs to be preprocessed in order to be used for prediction [3]. The power of machine learning algorithms is based on cross validation. That is, the entire series is used in separate sections to train a single model. However, this situation is different from standard statistical time series algorithms, where a separate model is developed for each series. In practical research, professional statistical software is used to design experiments or analyze data already collected.

In this study, we used R software packages. R has emerged as a pretty good tool for scientific computational tasks over the last few decades and has found a consistent place in the

application of statistical methodologies to analyze data. In order to use ensemble time series models in forecasting processes, first of all, it is necessary to include the Hybrid model library in the R programming and development environment. The hybrid package of the R development environment provides a convenient platform for assembling heterogeneous time series models. The main function that provides this task is the `hybridModel` function. This model takes a string of up to six characters as input, and each character represents a pattern. For example, the character `a` is used for `auto.arima`, `e` for `ets`, `f` for `thetam`, `n` for `nnetar`, `s` for `stlm`, and finally `t` for `tbats`.

The R development environment proves that hybrid models have better forecasting performance in short-term forecasting analyzes using time series. The four main contributions of this article can be summarized as follows:

(1) To use all combinations of statistics-based and deep learning-based models such as `auto.arima`, `ets`, `thetam`, `nnetar`, `stlm` and `tbats` in predictive analysis.

(2) To prove that the new hybrid model proposed in this study has higher accuracy and stronger stability, compared with the models used alone.

(3) To achieve lower MAPE values and higher accuracy in short-term forecasting with the proposed hybrid model.

(4) To compare predictions made with variable-weighted, equi-weighted, and cross-validation-weighted approaches when using hybrid models.

Literature review

In the literature, forecasting models are generally classified into three categories [4]. The first group consists of time series [5]–[10] or statistics-based methods [11], while the second group is artificial intelligence-based methods (machine learning [12], deep learning [13], genetic algorithm [14]). The last group is hybrid methods based on statistics and deep learning or a combination of genetic algorithms and other models [11].

Artificial intelligence-based models started to become popular between 1992-2006, and the intensive use of vector support machines contributed to the development of machine learning in the field of artificial intelligence. Furthermore, as compared to statistical models, machine learning models offer clear benefits in processing complicated nonlinear data, particularly in terms of short-term consumption forecasting accuracy [15]. In recent years, more and more scientists have started using intelligent algorithms such as fuzzy theory models, support vector machine models, and neural network. Although smart algorithms offer more advantages than standard algorithms, they also have certain inherent drawbacks, such as high calculation times, sluggish convergence speed, and easiness of early convergence. As a result, the optimization prediction model is still a hotly debated research area [16].

Recently, hybrid models have been used extensively by researchers for time series estimation. Smyl et al. suggested a hybrid estimating technique for the M4 competition that

combines the exponential smoothing model with sophisticated long-short-term memory (LSTM) neural networks in a single framework. Exponential smoothing equations are used for the method to effectively capture the main components of individual series, such as seasonality and level, while LSTM networks are used to allow for nonlinear trends and cross-learning [3]. Zhang et al. proposed a hybrid methodology combining ARIMA and ANN models for linear and nonlinear modeling. Experimental results with real datasets conclude that the combined model further improves the prediction accuracy achieved by either of the models used separately [17]. Ma et al. combined a basic statistical time series model with a machine learning algorithm in their work. More specifically, they sequentially combined an ARIMA model called NN-ARIMA with a basic neural network model. According to the experimental results, the proposed approach significantly reduces the mean square error and thus improves the accuracy of the estimation [18]. Castillo et al. proposed a hybrid fuzzy fractal approach to estimate confirmed covid-19 cases and deaths for ten countries based on time series [19]. Based on variable mode decomposition, particle swarm optimization, and deep belief networks, Li et al. suggested a hybrid forecasting model of monthly Henry Hub natural gas prices [20]. Gao et al. proposed a new hybrid forecasting model based on a support vector machine and an improved artificial fish swarm algorithm to predict annual natural gas consumption [21]. Atici and Pala used the hybrid model in their study for the Ionospheric foF2 parameter estimation [22]. Qiao et al. proposed a hybrid model for hourly gas consumption in their study [16]. Tseng et al. proposed a hybrid gray model to predict seasonal time series [23]. Chang et al. proposed a new hybrid model for electricity price estimation. In their study, the authors proposed a hybrid model based on Adam optimized LSTM neural network and wavelet transform [24]. Du et al. proposed a new hybrid model for short-term wind energy prediction in their study. The focus of their work was on improving forecast accuracy and stability, single-step and multi-step wind energy forecasting, and comprehensive performance validation of forecast models [25]. Meira et al. combined bootstrap aggregation, univariate time series estimation methods and modified regularization routines in their study. They introduced a new type of bagging that uses maximum entropy bootstrap and a modified regularization routine that keeps the data generation process in the community [26].

Unlike the aforementioned literature, in this study, the HybridModel library of the R development environment is proposed to achieve higher accuracy and stability on the same time series. The proposed system consists of four different approaches: One of them is used as an approach in which independent models play a role alone in the prediction process, while the second, third, and fourth approaches are hybrid-based as variable-weighted, equal-weighted and cross-validation-weighted, respectively.

Methodologies

As a specific topic of machine learning, collective learning is generally concerned with combining multiple models to provide higher accuracy and stable model performance. Community methodology has played a role in successful scenarios in complex data science applications. The ForecastHybrid library is a library designed for the R programming language. This library, which is used in the RStudio environment, has been used in many researches before [3], [22], [27], it offers a common forecast by combining the forecasting capabilities of many functions individually in the forecast library used in the same environment. Here, time series future predictions are made with single-model [12] and multi-model approaches using the hybrid model library in the R programming language environment.

Performance evaluation

Many different metrics can be used in the literature to evaluate the performance of models used in time series forecasting [28], [29]. In this study, mean absolute percentage error (MAPE) [30] metric, which is easier to interpret and have better accuracy than others, were preferred. The lower the MAPE value, the better the method.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|y_t - \hat{y}_t|}{|y_t|} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Where y_t , is the time series value at time t , \hat{y}_t is the estimated prediction, n is the number of data points available in the sample.

Results and Discussion

Four different approaches were used in the time series forecasting analysis performed in this study. One of these approaches is independent and the remaining three are carried out using hybrid models. Airpassengers monthly time series was used in all four different approaches. Airpassengers time series is in the "datasets" library in the R development environment and consists of 144 months of observation data. In the forecast analysis, 132 months of data were used for training, while the remaining 12 months of data were used for testing. The data used for training and testing processes constitute 91% and 9% of the total data, respectively. Six models were used independently in the first approach. One of these models used is deep learning and the others are statistical-based architectures. Models TBATS, ETS, THETAF, ARIMA, STLF and NNTAR can be used standalone, whereas tbats (t), ets (e), thetam (f), auto.arima (a), stlm (s), and nnetar (n) models were used in the hybrid environment, respectively.

The MAPE metric values obtained in the estimation process using independent models are given in Table 1. MAPE values express the error made as a percentage, and smaller values indicate higher accuracy. For example, while the prediction error of the NNTAR model, which makes the

best prediction in this approach, is 3.29%, the prediction accuracy is 96.71%. In this approach, the mean MAPE value for six different models was calculated as 4.36%.

Table 1. MAPE metric values of 6 different models obtained as a result of 12-month estimation of Airpassengers time series

Model	MAPE (%)
NNTAR	3.29
TBATS	3.35
ARIMA	4.18
ETS	4.65
THETAF	5.32
STLF	5.39
Average	4.36

Figure 1 shows 12-month forecast graphs in the 80% and 95% range based on the MAPE metrics of the TBATS, ETS, THETAF, ARIMA, STLF, and NNTAR models.

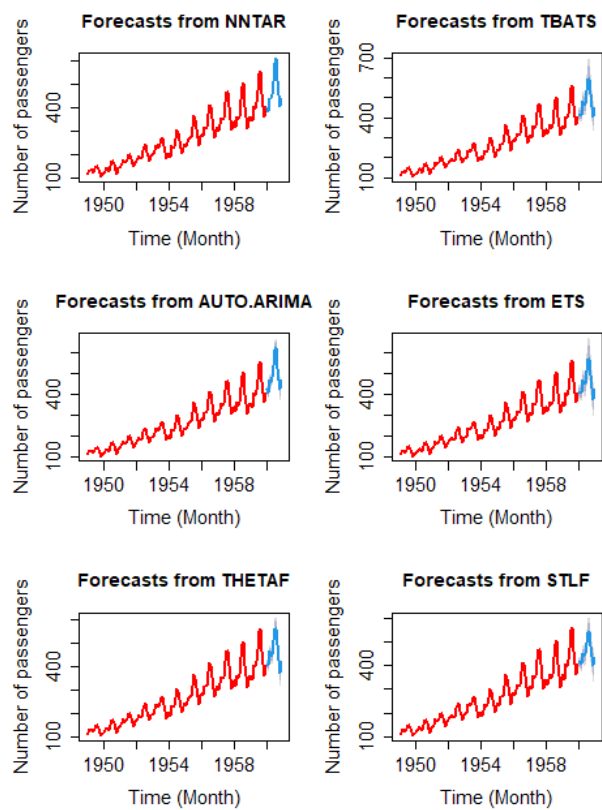


Figure 1. Representation of 12-month forecasts with prediction ranges of 80% and 95% utilizing six distinct deep learning and statistics models

As seen in Figure 1, the dark shaded region contains 80% of the projected intervals. In other words, with an 80% likelihood, each prospective value is expected to be in the dark shaded range. The light shaded area displays 95% prediction intervals. These forecasting intervals are a helpful way to demonstrate variability in the prediction. In this case, the forecast is assumed to be reliable, and thus the forecast intervals are very narrow. The blue line is the average of potential future values, which we call the point forecasts.

In the second, third and fourth stages of the analysis, estimations were made using equi-weighted (EW),

variable-weighted (VW) and cross-validation-weighted (CVW) approaches, respectively. Among the hybrid model approaches, auto.arima (a), ets (e), thetam (f), nnetar (n), stlm (s) and tbats (t) models were used. Combinations of six different models, at least dual, were calculated as in equation (2).

$$C(n, r) = \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (2)$$

Here, the n parameter represents the number of models that can be used together in the hybrid model, while the r parameter represents the multiple situations used together.

In this case, for 15, 20, 15, 6 and 1 forecast analysis, C(6.2), C(6.3), C(6.4), C(6.5) and C(6.6) model combinations were used. The MAPE metric values of the analyzes of the EW, VW and CVW approaches using the hybrid model using dual-model, triple-model, quartet-model, quintuple-model and six-model are given in Table 2, Table 3, Table 4, Table 5 and Table 6, respectively [31].

In Figure 2, the graphs of the best dual models of the EW, VW and CVW hybrid approaches are given as nt, fn and nt, respectively. In Figure 3, the graphs of the best triple models of EW, VW and CVW hybrid approaches are given as aen, aen and aen.

Table 2. MAPE metric values of 15 forecasting processes obtained with the help of EW, VW and CVW approaches using dual hybrid model

Dual-model	EW MAPE Test (%)	VW MAPE Test (%)	CVW MAPE Test (%)
fn	3.20	2.87	3.31
nt	2.89	2.92	2.91
ae	2.99	3.00	3.02
an	3.01	3.10	2.94
af	3.01	3.23	3.06
en	2.89	3.26	2.96
ft	3.54	3.30	3.64
et	3.37	3.44	3.42
at	3.41	3.46	3.39
as	3.60	3.62	3.87
ns	3.55	3.95	3.75
st	3.93	4.04	4.12
es	4.61	4.61	4.62
ef	4.99	4.78	4.99
fs	4.95	4.96	4.91
Average	3.60	3.64	3.66

Table 3. MAPE metric values of 20 forecasting processes obtained with the help of EW, VW and CVW approaches using triple hybrid model

Triple-model	EW MAPE Test (%)	VW MAPE Test (%)	CVW MAPE Test (%)
aen	2.76	2.81	2.80
afn	2.79	2.83	2.85
fnt	3.03	2.93	3.07
ant	2.90	2.96	2.91
aef	3.23	3.03	3.34
ent	3.02	3.07	3.03
aet	3.09	3.08	3.10
aft	3.10	3.10	3.11
ans	3.08	3.19	3.25

ast	3.45	3.47	3.56
nst	3.34	3.55	3.43
efn	3.67	3.58	3.76
aes	3.60	3.61	3.78
eft	3.82	3.61	3.94
afs	3.67	3.64	3.87
ens	3.69	3.89	3.79
fns	3.83	3.92	3.93
est	3.89	3.95	4.02
fst	3.98	4.04	4.10
efs	4.85	4.69	4.83
Average	3.44	3.45	3.52

Table 4. MAPE metric values of 15 forecasting processes obtained with the help of EW, VW and CVW approaches using quad hybrid model

Quad-model	EW MAPE Test (%)	VW MAPE Test (%)	CVW MAPE Test (%)
afnt	2.88	2.85	2.90
aefn	2.96	2.90	2.97
aent	2.85	2.93	2.90
aeft	3.16	3.10	3.19
efnt	3.19	3.14	3.27
anst	3.12	3.20	3.21
afns	3.23	3.23	3.43
aens	3.23	3.33	3.36
aest	3.40	3.43	3.56
afst	3.45	3.45	3.62
fnst	3.50	3.58	3.64
enst	3.44	3.60	3.54
aefs	3.70	3.64	3.85
efns	3.91	3.93	3.98
efst	4.02	3.96	4.12
Average	3.34	3.35	3.44

Table 5. MAPE metric values of 6 forecasting processes obtained with the help of EW, VW and CVW approaches using quintuple hybrid model

quintuple-model	EW MAPE Test (%)	VW MAPE Test (%)	CVW MAPE Test (%)
aefnt	3.00	2.99	3.02
afnst	3.19	3.22	3.31
aenst	3.19	3.25	3.25
aefns	3.38	3.38	3.49
aefst	3.51	3.46	3.66
efnst	3.58	3.62	3.62
Average	3.31	3.32	3.39

Table 6. MAPE metric values of 1 forecasting processes obtained with the help of EW, VW and CVW approaches using six hybrid model

Six-model	EW MAPE Test (%)	VW MAPE Test (%)	CVW MAPE Test (%)
aefnst	3.26	3.28	3.40

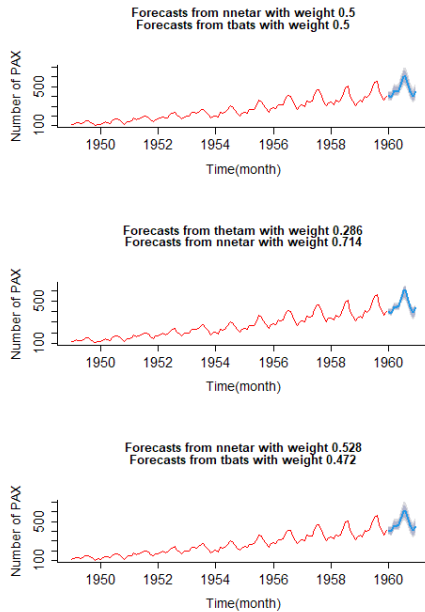


Figure 2. Prediction plots of best dual models of hybrid EW, VW and CVW approaches

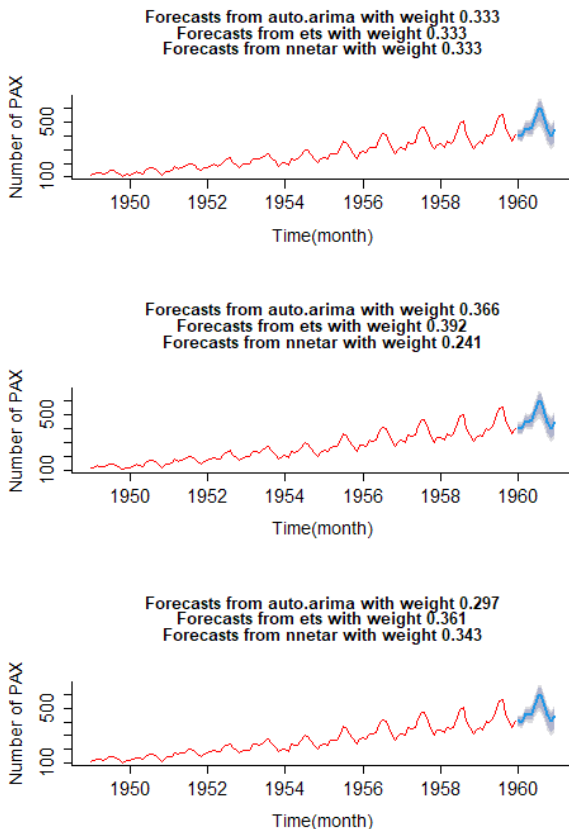


Figure 3. Prediction plots of best triple models of hybrid EW, VW and CVW approaches.

1. As a result of the estimations made using single models, the MAPE average obtained was found to be 4.36%. The MAPE average values obtained as a result of hybrid dual-model analyzes performed with EW, VW and CVW approaches

were obtained as 3.60%, 3.64% and 3.66%, respectively.

2. The MAPE mean values obtained as a result of hybrid triple-pattern analyzes performed with EW, VW and CVW approaches were obtained as 3.44%, 3.45% and 3.52%, respectively.
3. The MAPE average values obtained as a result of hybrid quad-pattern analyzes performed with EW, VW and CVW approaches were obtained as 3.34%, 3.35% and 3.44%, respectively.
4. The MAPE mean values obtained as a result of hybrid quintuple-pattern analyzes performed with EW, VW and CVW approaches were obtained as 3.31%, 3.32% and 3.39%, respectively.
5. The MAPE mean values obtained as a result of the hybrid six-model analyzes performed with the EW, VW and CVW approaches were obtained as 3.26%, 3.28% and 3.40%, respectively.
6. The accuracy of the predictions made with hybrid models gave better results than those made with single models.

Conclusion

In this study, the results of six models used alone in the estimation process were compared with the results of the models used in the hybrid environment. Our results show that collaborative model results are better than non-collaborative model results.

The main conclusion is that the hybrid set of forecasts can yield lower MAPE than either of the non-combined model forecasts.

References

- [1] E. Gjika, A. Ferrja, and A. Kamberi, "A Study on the Efficiency of Hybrid Models in Forecasting Precipitations and Water Inflow Albania Case Study," *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, vol. 4, no. 1, pp. 302–310, 2019.
- [2] P. N. Tattar, *Hands-on Ensemble Learning with R*. Birmingham, Mumbai: Packt Publishing Ltd, 2018.
- [3] S. Smyl, "A hybrid method of exponential smoothing and recurrent neural networks for time series forecasting," *Int. J. Forecast.*, vol. 36, no. 1, pp. 75–85, 2020.
- [4] F. Yu and X. Xu, "A short-term load forecasting model of natural gas based on optimized genetic algorithm and improved BP neural network," *Appl. Energy*, vol. 134, pp. 102–113, 2014.
- [5] Z. Pala, "Examining EMF Time Series Using Prediction Algorithms With R," vol. 44, no. 2, pp. 223–227, 2021.
- [6] Z. Pala and M. Şana, "Attackdet: Combining web data parsing and real-time analysis with machine learning," *J. Adv. Technol. Eng. Res.*, vol. 6, no. 1, pp. 37–45, 2020.
- [7] Z. Pala and R. Atici, "Forecasting Sunspot Time Series

- Using Deep Learning Methods,” *Sol. Phys.*, vol. 294, no. 5, 2019.
- [8] Z. Pala and A. F. Pala, “Comparison of ongoing COVID-19 pandemic confirmed cases / deaths weekly forecasts on continental basis using R statistical models,” *Dicle Univ. J. Eng.*, vol. 4, pp. 635–644, 2021.
- [9] Z. Pala and O. Özkan, “Artificial Intelligence Helps Protect Smart Homes against Thieves,” *DÜMF Mühendislik Derg.*, vol. 11, no. 3, pp. 945–952, 2020.
- [10] Z. Pala and A. F. Pala, “Perform Time-series Predictions in the R Development Environment by Combining Statistical-based Models with a Decomposition-based Approach,” *J. Muş Alparslan Univ. Fac. Eng. Archit.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–13, 2020.
- [11] V. Makridakis, S., Spiliotis, E., Assimakopoulos, “Statistical and Machine Learning forecasting methods: Concerns and ways forward,” *PLoS One*, vol. 13, no. 3, p. e0194889, 2018.
- [12] Z. Pala, İ. H. Ünlük, and E. Yaldız, “Forecasting of electromagnetic radiation time series: An empirical comparative approach,” *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, vol. 34, no. 8, pp. 1238–1241, 2019.
- [13] M. Långkvist, L. Karlsson, and A. Loutfi, “A review of unsupervised feature learning and deep learning for time-series modeling,” *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 42, no. 1, pp. 11–24, 2014.
- [14] D. Gidon, X. Pei, A. D. Bonzanini, D. B. Graves, and A. Mesbah, “Machine Learning for Real-time Diagnostics of Cold Atmospheric Plasma Sources,” no. April, 2019.
- [15] J. Liu, S. Wang, N. Wei, X. Chen, H. Xie, and J. Wang, “Natural gas consumption forecasting: A discussion on forecasting history and future challenges,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 90, no. January, p. 103930, 2021.
- [16] W. Qiao, K. Huang, M. Azimi, and S. Han, “A Novel Hybrid Prediction Model for Hourly Gas Consumption in Supply Side Based on Improved Whale Optimization Algorithm and Relevance Vector Machine,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 88218–88230, 2019.
- [17] P. G. Zhang, “Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model,” *Neurocomputing*, vol. 50, pp. 159–175, 2003.
- [18] T. Ma, C. Antoniou, and T. Toledo, “Hybrid machine learning algorithm and statistical time series model for network-wide traffic forecast,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 111, no. January, pp. 352–372, 2020.
- [19] O. Castillo and P. Melin, “Forecasting of COVID-19 time series for countries in the world based on a hybrid approach combining the fractal dimension and fuzzy logic,” *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 140, p. 110242, Nov. 2020.
- [20] J. Li, Q. Wu, Y. Tian, and L. Fan, “Monthly Henry Hub natural gas spot prices forecasting using variational mode decomposition and deep belief network,” *Energy*, vol. 227, p. 120478, 2021.
- [21] F. Gao and X. Shao, “Forecasting annual natural gas consumption via the application of a novel hybrid model,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, no. 17, pp. 21411–21424, 2021.
- [22] R. Atici and Z. Pala, “Prediction of the Ionospheric foF2 Parameter Using R Language Forecast hybrid Model Library Convenient Time,” *Wirel. Pers. Commun.*, no. doi.org/10.1007/s11277-021-09050-6 Prediction, pp. 1–20, 2021.
- [23] F. M. Tseng, H. C. Yu, and G. H. Tzeng, “Applied hybrid grey model to forecast seasonal time series,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 67, no. 2–3, pp. 291–302, 2001.
- [24] Z. Chang, Y. Zhang, and W. Chen, “Electricity price prediction based on hybrid model of adam optimized LSTM neural network and wavelet transform,” *Energy*, vol. 187, p. 115804, 2019.
- [25] P. Du, J. Wang, W. Yang, and T. Niu, “A novel hybrid model for short-term wind power forecasting,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 80, pp. 93–106, 2019.
- [26] E. Meira, F. L. C. Oliveira, and L. M. de Menezes, “Forecasting natural gas consumption using Bagging and modified regularization techniques,” *Energy Econ.*, vol. 106, no. January, p. 105760, 2022.
- [27] Z. Pala, “Using forecast Hybrid Package to Ensemble Forecast Functions in the R,” *Int. Conf. Data Sci. Mach. Learn. Stat. - 2019*, vol. 1, no. 1, pp. 45–47, 2019.
- [28] R. J. Hyndman and A. B. Koehler, “Another look at measures of forecast accuracy,” *Int. J. Forecast.*, vol. 22, no. 4, pp. 679–688, Oct. 2006.
- [29] S. Kim and H. Kim, “A new metric of absolute percentage error for intermittent demand forecasts,” *Int. J. Forecast.*, vol. 32, no. 3, pp. 669–679, 2016.
- [30] S. Makridakis, E. Spiliotis, and V. Assimakopoulos, “The M4 Competition: 100,000 time series and 61 forecasting methods,” *Int. J. Forecast.*, vol. 36, no. 1, pp. 54–74, Jan. 2020.
- [31] I. H. Unluk, “Ensembling Time Series Algorithms with Hybrid Models to Predict R Environment Specific Datasets,” Muş Alparslan University, 2022.



Applying graph convolution networks to recommender systems based on graph topology

Alper ÖZCAN^{1*}

¹Akdeniz University, Computer Engineering Department, alperozcan@akdeniz.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-5999-1203

ARTICLE INFO

Article history:

Received 01 March 2022
Received in revised form 05 April 2022
Accepted 12 April 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Recommender systems, graph convolution network, deep learning, graph modelling

ABSTRACT

The recommender systems are widely used in online applications to suggest products to the potential users. The main aim of recommender system is to produce meaningful recommendation to a potential user by monitoring user's purchasing habits, history, and useful information. Recently, graph representation learning methods based on node embedding have drawn attention in Recommender systems such as Graph Convolutional Networks (GCNs) that is powerful method for collaborative filtering. The GCN performs neighborhood aggregation mechanism to extract high level representation for both user and items. In this paper, we propose a recommendation algorithm based on node similarity convolutional matrices with topological property in GCNs where the linkage measure is illustrated as a bipartite graph. The experiments indicate the necessity of capturing user-item graph structure in recommendation. The experimental results show that node similarity-based convolution matrices and GCN-based embeddings significantly improve the prediction accuracy in recommender systems compared to state-of-art approaches.

Doi: 10.24012/dumf.1081137

* Corresponding author

Introduction

The modern era is quickly adopting technology in every aspect, especially e-commerce websites. Today, people like to shop on e-commerce websites as it provides a wide list of products. With the presence of such websites, consumers can select items with their preferences. However, listing plenty of products comes with the drawback of listing inappropriate products to the users. Providing appropriate and interesting items to the users makes a shopping experience more efficient and it enhances the customer satisfaction to the retailers. To enhance customer satisfaction and experience, even more, many retailers are recommending products to the users to increase their profits by keeping the customer loyal to their websites. The recommending process requires different analyses to keep the potential customer loyal to the retailer. E-commerce giants such as Amazon, AliExpress, Netflix, etc., are using recommender systems to suggest items to users.

The main purpose of the recommender system is to suggest items to the user. The items could be books, movies, music, news, etc. To recommend the best possible items to the user a series of information of a user is monitored such as demographic information, purchase behavior, rating behavior, previous history. In the past, these intelligent

recommender systems helped Amazon to increase its profit to 35%, BestBuy to 24%, increased 75% views for Netflix, and 60% growth in views for YouTube [1]. Hence, designing a personalized recommender system is helping not only the e-commerce industry but other fields such as health care, food industry, academia, and more.

There are plenty of recommender systems but the standard algorithms such as collaborative filtering, content-based filtering model the user-item rating as a matrix and predict the rating for potential unrated items. Previously in the literature models like Collaborative Filtering (CF) use similarity index between the neighbors or items to recommend items. The model-based approaches such as Matrix Factorization (MF) are used to recommend products as a representation problem of the big user-item matrix. The main challenge these previous models face is the complexity of the user behavior towards multiple items. To resolve such issues neural network-based models are proposed [2, 3, 4]. However, these models are still limited to capturing the high-structured data.

However, among other divisions of the recommender systems, it can be divided into three stages: shallow models [5, 6, 7], neural models, and GNN-based models [8, 9, 10]. Recently, graphical networks based on deep learning

concepts have shown promising results in recommendation systems. Graph Convolutional Networks (GCN) has brought new ideas to tackle some of the conventional artificial intelligence problems. It transforms the regular convolutional operation into a graphical structure and generates node representations using a graph aggregator. A simple graph aggregator calculates the node representation by aggregating its local neighbors and multiple layers of such aggregators are stacked non-linearly to build a deep neural network. Such architectures are also promising results in recommender systems. Monti et al. proposed a recommender system in which GCN was used to aggregate the user-user and item-item graphical information [11].

The user-item interaction can be represented as a bipartite graph. Different graphical algorithms have been used to recommend items to the users either as a simple random walks or more complex methods such as [9, 10, 12, 13, 14]. In such methods, the key concept is to fetch high order neighbors' information which captures the diverse information. The aim of these graphical methods is to capture more complex and diverse information about the user and its neighbors that could help for recommending better items.

In this study, we propose a GCN-based model that captures the topology of the bipartite network between user and item and verifies the efficiency of those topological measures in context of recommender system. To evaluate our model Amazon product purchasing network dataset is used. The main contributions of this paper are three-fold:

- We propose a GCN-based architecture for recommender systems to learn graph topology of users and items in bipartite network settings
- Local measures of node similarity metrics can provide effective features for GCN to propagate node embeddings across the network in a way that is useful for recommender system.
- To evaluate our model, we experimented on the real datasets and obtained results indicate that the proposed model produce much diverse and improved recommendations.

Literature Review

This section is divided into three parts. Firstly, a general overview of recommender system is discussed that contains traditional recommendation techniques. In the second part the concept of graph-based recommender system is presented by discussing state of the art approaches in this area. Finally, different graph neural networks approaches are mentioned to provide sufficient knowledge to the reader.

Recommender Systems

The main purpose of recommender system is to recommend the items to the users. The recommender systems have seen tremendous growth in the literature and still it is one of the hot topics that need exploration even though many mature and reliable algorithms have been developed. Techniques

like collaborative filtering, content-based filtering, neighborhood methods are presented for a long time in the literature. The content-based recommender system requires items description that may include its genre, actor, producer, author of a book, etc., to construct the profile of a user [16]. The recommendation is generated based on the similarity between the user profile and specific item description [17].

On the other hand, collaborative filtering does not require a detailed description of the item [18]. It is based on the user's personalized recommendations that are predicted by using the user's past behavior. It takes the ratings given by the user into a matrix where rows represent the users and columns represent the items [19]. Each cell in this matrix represents the degree of preference of a user towards an item. Further, collaborative filtering methods are divided into model-based and memory-based models [20]. Model-based approaches are Principal Component Analysis, Singular Value Decomposition [21]. Memory-based models calculate the similarity between the nearest neighbors such as Pearson Coefficient, and cosine distance [22]. Moreover, deep learning techniques have shown improvements in the recommender system domain as they tackle more complex data.

Graph-Based Recommender Systems

Graphs are used to represent complex data and it is one of the best possible ways to interpret complex problems. Recently, graph-based techniques in recommender systems have shown promising improvements by analyzing complex and deep interaction between the users and items. The graphs convert the recommendation problem to the link prediction task which utilizes different link prediction techniques such as random walks to find the similarities in the user-user, user-item, or item-item data [23]. Generally, in the link prediction task, the aim is to classify the nodes, however, the recommendation task is a regression problem. So, the items are recommended based on how strong the relationship is between the user and item [24].

Li et al. proposed a graph-based recommender system that generates a bipartite graph between users and items. The kernel-based approach is used to generate the random walks between the user-item transaction. Two types of nodes for users and items are defined and the edge in the graph represents the transaction between the user-item node pair. Afterward, similarities are calculated by using random walks which can detect the more complex relationship between the user and item [25].

Zhang et al. proposed a music recommendation model in which the data is represented as a bipartite graph. The weight of the link between user and item was represented as a complex number that could determine the like and dislike of a user for a particular item [26, 27].

Generally, the graph-based models are used in heterogeneous networks in which the data is more complex. Graph-based recommender systems can effectively utilize such complex information and can find similarity measures between different nodes. By expanding the neighborhood of

a particular node, it can effectively compute the proximity between the user and item [28].

Graph Neural Networks in Recommendation Models

The advancement in the graph neural network provides an opportunity to address the recommender system problem present in the literature. For example, graph neural networks provides the better aggregation for the neighborhood embeddings. The stacking of the propagation layer can access the high order neighbor's information. It dominates previous methods by gathering the more structural information in the network [29].

Since the user-item interaction can be illustrated as graph the Graph Neural Networks can be easily modeled to represent such graphs. Qui et al. [30] proposed a personalized recommender system by using graph neural network to find the interesting courses for the learners. It resolved the issue of explicit representation of the products in which structural information of the products were not learned precisely. Secondly, other methods obtain the general user preference for items by neglecting the recent items. This method uses user's sequence neighbors and use an attention mechanism to generate an item representation.

Zhang et al. proposed a STACKed and Reconstructed Graph Convolutional Networks (STAR-GCN) architecture that learns the nodes representations in the graphs to boost the performance of the recommender system [31]. Zheng et al. proposed a GCN based model that pushes the model from diversification towards the upstream candidate meaning that it rebalances the newly discovered neighbors and categorize them to achieve better results [32].

Methods

The real-world platforms scenarios the interaction between the user and item is the strongest signal that illustrate the user's preferences towards the item. Thus, in this study we construct a graphical representation of such scenario in which users and items are two kinds of nodes and the edge between these nodes represent the interaction. To achieve the collaborative filtering effect with such model, GCN is used on the top sub-section of the graph which fetch the features from the respective nodes by propagating the nodes back and forth.

Problem Statement

The recommender system problem is defined as follows: Given the set of users and items such as $\{User1, User2, \dots, Usern\}$, $\{Item1, Item2, \dots, Itemk\}$ respectively, the rating R given by user Ui towards item Ij , the goal of recommender system is to recommend a new item Ij to the existing user Ui that is not purchased before [33].

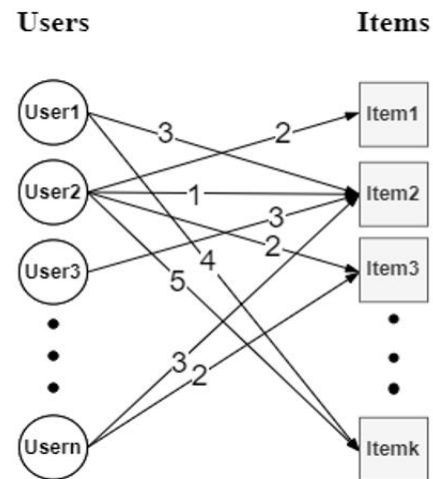


Figure 1. An example User-Item Bipartite Graph with ratings.

The recommender system can be illustrated as a bipartite graph as illustrated in Figure 1. The number on the edges between the links represents the weight between different nodes. A bipartite graph is containing exactly two types of nodes only an edge exists between two different node sets. A bipartite graph is defined as a graph $G = (V1 \cup V2, E)$ where $V1$ and $V2$ are two different node sets and E is the edge between two sets.

As described earlier the bipartite graph illustrates the users and items. The edge between these two entities occurs only when a user purchases an item. Once this interaction system is modeled as a graph all the link prediction schemes such as [34, 35] are applicable to predict the future links. This study [23] applies the common neighbors' method with the length of two for the prediction of future links. Another study [27] extended this methodology towards a heterogenous environment which produces better outcomes with rich graphical structure.

Moreover, the link prediction method aims to estimate the existence of a link based on the observed nodes in the graph. The graphical perspective of the product recommendation problem can be viewed as a selection of unobserved links for each node and model such nodes as a link prediction problem [36]. So, the main goal is to predict the possible link in the user-item network by observing the link information.

Furthermore, to extract the features from the network topology different graphical representation techniques are used to embed the nodes into a multi-dimensional space. A network embedding is illustrated in the form of a matrix $H \in R^{|V| \times d}$ where $|V|$ and d are the parameters that define the number of dimensions in embedding space.

Node and Network Embedding using GCN

GCN is similar to the filter in convolution and denotes the definition of convolution from the regular grid to irregular structures like graphs [37]. The node embeddings are updated as follows:

$$H^{l+1} = \delta D^{-\frac{1}{2}} A D^{-\frac{1}{2}} H^l W^l \quad (1)$$

Where $H^l \in R^{|V| \times d}$ represent the embedding matrix of l – th layer convolution, d is the embedding dimension. $A \in R^{|V| \times |V|}$ is the adjacency matrix with self-loops, and $D_{ii} = \sum_j A_{ij}$ is the degree matrix. All these operations are making sure that all the neighbors are receiving an aggregated message from multiple hop neighbors. The weights W^l in the GCN are trained using gradient descent.

GCNs are the simplified version of Graph Convolutional Neural Networks (GCNNs). A typical GCN consist of three steps 1) feature propagation, 2) linear transformation, and 3) application of a non-linear activation function [38]. Feature propagation is achieved using convolutional matrix computed from graph topology. For the linear transformation different parameters are learned to minimize a loss function and for that typical activation functions such as sigmoid or ReLU are used.

Proposed approach: Recommender system in bipartite networks using GCN and Node Similarities

The implementation of graph convolutional neural network consists of two steps and illustrated in Figure 2. In the first step graph is constructed with the input data. For instance, the user-item interaction matrix is converted into a bipartite graph where user/item is represented as a node and interaction between them is represented as an edge. By transforming the data into graphical form, the traditional recommender problem can be represented as a link prediction problem.

Figure 2 illustrates the workflow of GCN encoder and decoder proposed in the study. Firstly, the GCN deep encoder is constructed for the user-item prediction model, and ReLU activation function is used between the hidden layers of the encoder. The input consists of neighborhood information and topological similarity measures of a graph. The generated output is the embedding vector for each node fed to the model.

Secondly, the decoder predicts the similarity score for each user-item pair by decoding the embedding vectors. The key process of decoding is to represent the user-item relation into new space by reconstructing edges from the embedding space information.

The proposed model is trained on all learnable parameters and after experimenting it shows greater improvements in the performance, as all the parameters receive gradient values from loss function.

To give more details, the second step involves the GCN layer applied to the constructed bipartite graph. In this architecture the GCN is different than other traditional methods because of its propagation layer. The propagation layer chooses the optimal path to find the high order similarity between the neighbors. Moreover, this layer can be parametric that assigns different weights to the nodes depending on the similarity and importance.

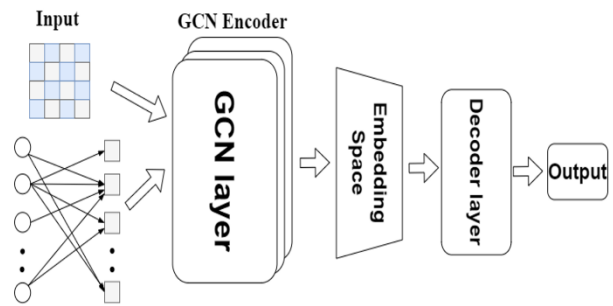


Figure 2. The overall procedure of implementing a GCN model: construct graphs from data, design GCN and prediction results with optimization.

Furthermore, various types of aggregation functions are used such as max, min, mean pooling, etc. Since there is no guarantee which aggregation function will perform better for different datasets, it is better to design a specific function that better suits the dataset. Also, these aggregation functions highly affect the performance of the model. For instance, the GNN-based recommendation system is used by using mean pooling that is computationally efficient. Meanwhile, these propagation/aggregation layers are stacked to achieve the high order neighbor hops to fetch diverse information. Moreover, modeling the too shallow or deep graphical structure will lead to poor recommendations. The shallow model cannot be modeled properly, and the deep model smoothens the node embeddings. Further, to achieve optimization traditional loss functions are turned into graphical learning losses. For example, the optimization log-loss is regarded as link prediction loss.

The proposed GCN model is composed of a graph convolutional layer and an embedding layer where the convolution layer serves the purpose of broadcasting and aggregation. Most of the studies in the literature use Laplacian-based convolutional matrix for network embeddings where the proposed study conjugates the convolution matrix with the single neural network layer for topological measures. After finding topological measures in the graph links are computed between each user-item pair for unrated items. These topological measures are helpful to assess the possible link scores between the entities. Further, Jaccard Index [23, 34] measures the direct number of neighbors for u and v .

To summarize the proposed approach, node embeddings are computed by using node similarity measures such as (CN, AA, JI, RA) between all nodes in the network and are fed to the GCN. These embeddings are used to predict and evaluate the links between the entities in a dataset.

Results and Discussion

Dataset

Amazon dataset (<http://jmcauley.ucsd.edu/data/amazon/>) for electronics, video games, movies, and tv is used for the evaluation of the proposed model. The dataset contains auxiliary information such as reviews, ratings, and item descriptions and illustrated in Table 1. Entities with at least 10 interactions are filtered to feed the model.

Table 1. Dataset detail.

Dataset name	#users	#items	#ratings
Electronics	67,345	45,398	2,719,345
Movies and TV	35,398	112,309	1,122,654
Video Games	10,123	34,643	729,332

The amazon dataset contains the user-item rating data, and these ratings are used to get the user-item interactions in the form of a graph. The proposed model utilizes these user-item ratings to create the embedding vectors to build a bipartite graph. Moreover, the split of 80% and 20% is used for training and testing the model respectively. Afterward, 5-fold cross-validation is used along with at least 10% of interactions to tune the parameters.

Experimental Settings and Evaluation Metrics

To evaluate the performance of the model AUROC, AUPR are used. Also, the following baseline models are compared to check the performance of our model. BPR-MF [34] which is a classical model to optimize the Bayesian personalized ranking loss, NeuMF [18] that learns the nonlinear interaction between user-item embeddings using multilayer perceptron's, and BiNE [14] uses biased random walks on bipartite graph to learn explicit and implicit relationship between user-item. For the baseline, all of the hyperparameters are initialized as presented in the original work and are carefully tuned to achieve optimal performance. Further, in proposed model the hyperparameters such as batch size, stopping criteria, learning rate are used for GCN.

Results

This section compares the result of proposed GCN model with the baseline models in terms of AUROC and AUPR. The experiments are performed on all three datasets. After comparing the outcomes our model performed better than other baseline models in all the three datasets. The results are illustrated in Table 2, Table 3, and Table 4.

Table 2. Test results for Amazon Electronics Dataset.

Models	AUROC	AUPR
GCN with CN	0.92	0.23
GCN with AA	0.90	0.21
GCN with JI	0.87	0.19
GCN with RA	0.88	0.20
BPR-MF	0.81	0.15
NeuMF	0.83	0.16
BiNE	0.87	0.19

Table 3. Test results for Movies and TV Dataset.

Models	AUROC	AUPR
GCN with CN	0.90	0.22
GCN with AA	0.93	0.25
GCN with JI	0.89	0.20
GCN with RA	0.86	0.21
BPR-MF	0.74	0.17
NeuMF	0.81	0.18
BiNE	0.86	0.18

Table 4. Test results for Amazon Video Games Dataset.

Models	AUROC	AUPR
GCN with CN	0.88	0.20
GCN with AA	0.89	0.22
GCN with JI	0.83	0.16
GCN with RA	0.85	0.18
BPR-MF	0.71	0.13
NeuMF	0.75	0.15
BiNE	0.81	0.16

The graph-based methods consistently performed better than baseline models, which represents the effectiveness of exploiting topological similarities between user-item interaction using bipartite graphs. Moreover, the achieved results indicate that convolutional matrices with topological similarities are more efficient and effective than Laplacian-based convolution in recommendation tasks. Moreover, the proposed model is tested on four different similarity measures that are Common Neighbor, Jaccard Index, Adamic Adar, Resource Allocation. The obtained results indicate that a single-layered GCN encoder based on node similarity performs better than the Laplacian-based convolution GCN.

Conclusion

This paper proposes a recommendation system that combines GCN with embedding vectors using similarity measures attained from graph topology. The traditional user-item interactions can convert into embeddings vectors with the usage of GCN. The achieved embedding vectors are used to construct a user-item bipartite graph and modeled as a recommender system. The proposed model is tested with three baseline models and achieves better results and performance using graph topology in the GCN model. In the future, the performance of the GCN can be improved by getting the semantic information of users such as their social information in the form of a graph.

References

- [1] M. Chui, "Artificial intelligence the next digital frontier?", McKinsey and Company Global Institute, 47:3–6, 2017.
- [2] H.Cheng, L. Koc, J. Harmsen, H. Cheng, L. Koc, J. Harmsen, T. Shaked, T. Chandra, H. Aradhye, G. Anderson, G. Corrado, W. Chai and M. Ispir, "Wide & Deep Learning for Recommender Systems", In Proceedings of the 1st workshop on deep learning for recommender systems, pp. 7–10, 2016.
- [3] H. Guo, R. Tang, Y. Ye, Z. Li and X. He, "DeepFM: a factorization-machine based neural network for CTR prediction", In Proceedings of the 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 1725-1731, 2017.
- [4] X. He, L. Liao, H. Zhang, L. Nie, X. Hu, and T. Chua, "Neural collaborative filtering", In Proceedings of the 26th international conference on world wide web, pp. 173-182, 2017.

- [5] Y. Koren, R. Bell, and C. Volinsky, "Matrix factorization techniques for recommender systems", *Computer*, 42(8), pp. 30-37, 2009.
- [6] S. Rendle, "Factorization machines", In 2010 IEEE International conference on data mining IEEE, pp. 995-1000, 2010.
- [7] S. Rendle, C. Freudenthaler, Z. Gantner, and L. Schmidt-Thieme, "BPR: Bayesian personalized ranking from implicit feedback", In Proceedings of the 25th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, pp. 452-461, 2009.
- [8] X. He, K. Deng, X. Wang, Y.N. Li, Y. Zhang, and M. Wang, "Lightgcn: Simplifying and powering graph convolution network for recommendation", In Proceedings of the 43rd International ACM SIGIR conference on research and development in Information Retrieval, pp. 639-648, 2020.
- [9] X. Wang, X. He, M. Wang, F. Feng, and T. Chua, "Neural graph collaborative filtering", In Proceedings of the 42nd international ACM SIGIR conference on Research and development in Information Retrieval, pp. 165-174, 2019.
- [10] R. Ying, R. He, K. Chen, P. Eksombatchai, W.L. Hamilton, and J. Leskovec, "Graph convolutional neural networks for web-scale recommender systems", In Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, pp. 974-983, 2018.
- [11] F. Monti, M. Bronstein, and X. Bresson, "Geometric matrix completion with recurrent multi-graph neural networks", In NIPS, pp. 3697-3707, 2017.
- [12] H. Wang, M. Zhao, X. Xie, W. Li, and M. Guo, "Knowledge graph convolutional networks for recommender systems", In the world wide web conference, ACM, pp. 3307-3313, 2019.
- [13] X. Wang, X. He, Y. Cao, M. Liu, and T. Chua, "KGAT: Knowledge Graph Attention Network for Recommendation", In KDD, pp. 950-958, 2019.
- [14] S. Wu, Y. Tang, Y. Zhu, L. Wang, X. Xie, and T. Tan, "Session-based recommendation with graph neural networks", In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, Vol. 33. Pp. 346-353, 2019.
- [15] C. Gao, Y. Zheng, N. Li, Y. Qin, J. Piao, Y. Quan, J. Chang, D. Jin, X. He, and Y. Li, "Graph Neural Networks for Recommender Systems: Challenges, Methods, and Directions", arXiv, 2021.
- [16] M. J. Pazzani and D. Billsus, "Content-based recommendation systems. The adaptive web: methods and strategies of web personalization", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 325-341, 2007.
- [17] R. J. Mooney and L. Roy, "Content-based book recommending using learning for text categorization", In Proceedings of the Fifth ACM Conference on Digital Libraries, DL '00, pages 195-204, ACM, 2000.
- [18] G. Linden, B. Smith, and J. York, "Amazon.com recommendations: Item-to-item collaborative filtering", *IEEE Internet computing*, 7(1):76-80, 2003.
- [19] J. Leskovec, A. Rajaraman, and J. D. Ullman, "Recommendation Systems", Cambridge University Press, 2 edition, 292-324, 2014.
- [20] Y. Koren, R. Bell, and C. Volinsky, "Matrix factorization techniques for recommender systems", *Computer*, 42(8):30-37, 2009.
- [21] B. Sarwar, G. Karypis, J. Konstan, and J. Riedl, "Analysis of recommendation algorithms for e-commerce", In Proceedings of the 2Nd ACM Conference on Electronic Commerce, EC '00, pages 158-167. ACM, 2000.
- [22] B. Shams and S. Haratizadeh, "Graph-based collaborative ranking", *Expert Syst. Appl.*, 67(C):59-70, 2017.
- [23] D. Liben-Nowell and J. Kleinberg, "The link-prediction problem for social networks", *Journal of The American Society For Information Science and Technology*, 58(7):1019-1031, 2007.
- [24] L. Zhang, M. Zhao, and D. Zhao, "Bipartite graph link prediction method with homogeneous nodes similarity for music recommendation", *Multimedia Tools and Applications*, pages 1-19, 2020.
- [25] X. Li and H. Chen, "Recommendation as link prediction in bipartite graphs: A graph kernelbased machine learning approach", *Decision Support Systems*, 54(2):880-890, 2013.
- [26] L. Zhang, M. Zhao, and D. Zhao, "Bipartite graph link prediction method with homogeneous nodes similarity for music recommendation", *Multimedia Tools and Applications*, pages 1-19, 2020.
- [27] R. N. Lichtenwalter, J. T. Lussier, and N. V. Chawla, "New perspectives and methods in link prediction", In Proceedings of the 16th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, KDD'10, pages 243-252. ACM, 2010.
- [28] B. Shams and S. Haratizadeh, "Graph-based collaborative ranking", *Expert Syst. Appl.*, 67(C):59-70, 2017.
- [29] T. J. Lakshmi and S. D. Bhavani, "Temporal probabilistic measure for link prediction in collaborative networks", *Applied Intelligence*, 47(1):83-95, Jul 2017.
- [30] R. Qiu, J. Li, Z. Huang, and H. Yin, "Rethinking the item order in session-based recommendation with graph neural networks", In Proceedings of the 28th ACM International Conference on Information and Knowledge Management, 579-588, 2019.
- [31] J. Zhang, X. Shi, S. Zhao, and I. King, "STAR-GCN: Stacked and Reconstructed Graph Convolutional Networks for Recommender System", *IJCAI*, 2019.
- [32] Y. Zheng, C. Gao, L. Chen, D. Jin, and Y. Li, "DGCN: Diversified Recommendation with Graph Convolutional Networks", In Proceedings of the Web Conference, 401-412, 2021.
- [33] D. Liben-Nowell, J.M. Kleinberg, "The link-prediction problem for social networks", *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 58, 1019-1031, 2007.

- [34] T. Zhou, L.-Y. Lu, Y.-C. Zhang, “Predicting Missing Links via Local Information”, arXiv: 0901.0553, 2009.
- [35] Z. Huang, D. D. Zeng, H. Chen, “Analyzing Consumer-Product Graphs: Empirical Findings and Applications in Recommender Systems”, *Management science*. Vol. 53, No. 7, pp. 1146–1164 2007.
- [36] J. Ben Schafer, Joseph A. Konstan, and John Riedl. E-commerce recommendation applications. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 5(1):115–153, 2001.
- [37] David K Hammond, Pierre Vandergheynst, and Rémi Gribonval. 2011. Wavelets on graphs via spectral graph theory. *Applied and Computational Harmonic Analysis* 30, 2 (2011), 129–150.
- [38] Zonghan Wu, Shirui Pan, Fengwen Chen, Guodong Long, Chengqi Zhang, and S Yu Philip. 2020. A comprehensive survey on graph neural networks. *IEEE transactions on neural networks and learning systems* 32, 1 (2020), 4–24.



EEG sinyallerini kullanarak Alzheimer hastalığının otomatik tespiti için bilgisayar destekli tanı sistemi

Computer aided diagnostic system for automatic detection of Alzheimer's disease using EEG signals

Zülfikar ASLAN^{1*}

¹Gaziantep Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, zulfikaraslan@gantep.edu.tr

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 24 Mart 2022
Revizyon 13 Haziran 2022
Kabul 14 Haziran 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

Dalgacık Dönüşümü, EEG,
Alzheimer Teşhisi, Sınıflandırma

ÖZ

Alzheimer beyindeki bozulmalardan kaynaklı bilişsel ve davranışsal eksiklikler gibi semptomlarla kendini gösteren önemli bir nörolojik hastalıktır. Alzheimer hastalığının kesin bir tedavi yöntemi bulunmamaktadır. Ancak hastalığın erken teşhisi ile hastalığın ilerlemesinin yavaşlatılması amaçlanmaktadır. Bu durum hastanın yaşam standartlarının korunmasında önem arz etmektedir. Ayrıca hastalığın tam olarak teşhisi deneyimli bir uzman tarafından değerlendirilecek olan maliyetli testler ve yorucu bir teşhis aşaması gerektirmektedir. Bu motivasyonla önerilen yöntemle Alzheimer hastalığının EEG sinyallerinden otomatik olarak gerçekleştirilmesini amaçlayan yeni bir bilgisayar destekli tanı sistemi sunulmaktadır. Sunulan çalışmada öncelikle ham EEG verilerine önişlem uygulanarak var olan gürültüler giderilmiştir. Sonraki aşamada ise her bir kanaldan alınan verilere dalgacık dönüşümü uygulandıktan sonra istatistiksel özellikler hesaplanmıştır. Elde edilen özelliklerin k-en yakın komşu (kNN) sınıflandırıcısı ile sınıflandırılmasıyla sağlıklı katılımcılar ile Alzheimer hastası katılımcılar 91.12% doğrulukla ayırt edilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 March 2022
Received in revised form 13 June 2022
Accepted 14 June 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Wavelet Transform, EEG, Diagnosis
of Alzheimer's, Classification

ABSTRACT

Alzheimer's is an important neurological disease that manifests itself with symptoms such as cognitive and behavioral deficits caused by deterioration in the brain. There is no definitive treatment for Alzheimer's disease. However, with early diagnosis of the disease, it is aimed to slow down the progression of the disease. This is important in maintaining the patient's living standards. In addition, a full diagnosis of the disease requires costly tests and a grueling diagnostic phase, which will be evaluated by an experienced specialist. With this motivation, a new computer aided diagnosis system is presented, which aims to automatically detect Alzheimer's disease from EEG signals with the proposed method. In the presented study, first of all, the existing noises were removed by preprocessing the raw EEG data. In the next step, statistical properties were calculated after applying wavelet transform to the data received from each channel. By classifying the obtained features with the k-nearest neighbor (kNN) classifier, healthy participants and Alzheimer's patients were distinguished with an accuracy of 91.12%.

Doi: 10.24012/dumf.1092569

* Sorumlu Yazar

Giriş

Alzheimer hastalığı dünya genelinde yaygın olarak görülen ve yaşa bağlı bunamanın en yaygın şekli olan önemli bir nörolojik rahatsızlıktır. Alzheimer hastalarında beyin aktiviteleri sağlıklı insanlara göre daha yavaştır ve en önemli semptomu bilişsel fonksiyonların bozulmasıdır [1], [2]. 2018 yılında dünya genelinde 50 milyon kişi bu hastalıktan etkilenirken 2030 yılında bu rakamın 82 milyon olması ve zamana bağlı olarak artış göstermesi öngörülmektedir [3]. Alzheimer hafif, orta ve şiddetli olmak üzere üç çeşit olarak görülmektedir. Alzheimer hastalığına sahip olan bir hasta hastalığın her bir aşamasında artan şekilde bilişsel fonksiyonlarını zamanla kaybeder. Alzheimer'ın erken teşhisi hastalığın giderek hızlı bir şekilde ilerlemesini önlemek için önem arz etmektedir. Bu nedenle Alzheimer tespiti için ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır.

Elektroensefalografi (EEG) sinyalleri beyin fonksiyonlarının incelenmesinde yaygın olarak kullanılan önemli bir araçtır. EEG sinyallerinin diğer biyomedikal görüntüleme (CT- Bilgisayarlı Tomografi, MRI- Manyetik Rezonans Görüntüleme, PET- Pozitron Emisyon Tomografi, fMRI - Fonksiyonel Manyetik Rezonans Görüntüleme gibi) yöntemlerine kıyasla daha düşük maliyet ve daha düşük zaman gerektirmesinden birçok hastalığın teşhisini amaçlayan bilgisayar destekli tanı sistemlerinin geliştirilmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Makine öğrenmesi birçok alanda kullanılmış ve tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin çevre alanında bir çalışmada Buyrukoğlu ve arkadaşları, tarımsal yüzey sularında Salmonella varlığının öngörülmesi için belirlenen korelasyon değerinin başarısını araştırmışlardır [25]. Spor alanında bir çalışma da ise araştırmacılar futbolcuların pozisyonlarını belirlemek için yığılmış topluluk öğrenme modeli önermişler ve 83.9% sınıflandırma başarımı elde etmişlerdir [26]. Eğitim alanında gerçekleştiren bir başka çalışmada ise akademik enstitüler tarafından toplanan büyük miktarda veri üzerinde farklı Makine Öğrenimi algoritmalarının uygulanmasına ilişkin bir literatür taraması sunulmuştur [27].

Literatürde Alzheimer hastalığını ayırt etmek amacıyla yukarıda bahsedilen biyomedikal görüntüleme yöntemleri dışında EEG sinyallerinin analiz edilerek ve makine öğrenmesi algoritmasıyla sınıflandırılmasıyla gerçekleştirilen bir çok literatür çalışması bulunmaktadır [1], [4]-[9].

Kulkarni ve arkadaşları [4], çalışmada Alzheimer'ı teşhis etmek amacıyla EEG sinyallerinden farklı özellik (Spektral özellikler, dalgacık dönüşümü özellikleri, karmaşıklık özellikleri) çıkarım yöntemleri gerçekleştirmiştir. Elde ettiği özellikleri Destek Vektör Makinaları (SVM) sınıflandırıcısı ile sınıflandırarak sırasıyla spektral özellikler için 86%, dalgacık dönüşümü özellikleri için 88% ve karmaşıklık özellikleri için 96% sınıflandırma başarımı elde etmiştir. Yine benzer bir çalışmada Bairagi [1], EEG sinyallerinden spektral tabanlı özellikler ve dalgacık dönüşümü tabanlı özellikler

elde etmişlerdir. Bu özellikleri iki farklı sınıflandırıcı (SVM ve kNN) ile sınıflandırmışlardır. Çalışmalarında en yüksek sınıflandırma performansını spektral tabanlı özelliklerin SVM algoritması ile sınıflandırılmasıyla 94% olarak elde etmişlerdir. Ruiz-Gómez ve arkadaşları [5], Alzheimer tespiti için EEG sinyallerinden elde ettikleri spektral ve lineer olmayan özellikleri birleştirerek elde ettikleri özellikleri farklı makine öğrenme algoritmaları ile sınıflandırmışlardır. Çalışmalarında Alzheimer ve sağlıklı kontrolleri en yüksek Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ve Kuadratik Diskriminant Analizi (QDA) algoritmaları ile 78.43% olarak elde etmişlerdir. Amezcua-Sanchez ve arkadaşları [6] Alzheimer teşhisini amaçlayan çalışmalarında EEG sinyallerine çoklu sinyal sınıflandırması and ampirik dalgacık dönüşümü (MUSIC-EWT) adını verdikleri yöntemlerini uygulamışlardır. Sonrasında ise Hurst üs ölçüleri ve Fraktal boyut özelliklerini hesaplamışlardır. Bu özellikleri Gelişmiş olasılıksal sinir ağı (EPNN) sınıflandırıcı ile sınıflandırarak 90.3% doğruluk elde etmişlerdir. Kulkarni bir çalışmada [7], EEG sinyalinden elde ettiği spektral ve karmaşıklık özelliklerini birleştirmişlerdir. Sonrasında ise bu özellikler kNN sınıflandırıcısı kullanarak sınıflandırmış ve Alzheimer teşhisini en yüksek 94% doğrulukla tespit etmişlerdir. Tzamourta ve arkadaşları [8] çalışmalarında EEG sinyallerinden hesapladıkları istatistiksel ve spektral özellikleri farklı sınıflandırma algoritmalarıyla test etmişlerdir. En yüksek sınıflandırma performansını Rastgele Orman algoritması ile 88.79% olarak elde etmişlerdir. Buyrukoğlu çalışmada Normal, Hafif Bilişsel Bozukluk ve Alzheimer hastalığı durumlarını sınıflandırmak için bir yöntem önermişler ve 91% sınıflandırma başarımı elde etmişlerdir [28]. Buyrukoğlu diğer bir çalışmada ise Normal, Hafif Bilişsel Bozukluk ve Alzheimer hastalığı durumlarını AdaBoost sınıflandırıcısı ile sınıflandırarak başarılı bir sınıflandırma performansı sergilemişlerdir [29].

EEG sinyallerinin analizi için çeşitli algoritmalar ve yeni işlem teknikleri sunulmaktadır. EEG sinyallerinden Alzheimer tespiti gerçekleştiren CAD sistemlerinin performansını etkileyen sınırlamalar bulunmaktadır. İlgili literatür çalışmalarında uygun özellik seçim yöntemlerinin belirlenememesi veya önemli bilgiler taşıyan EEG kanallarının dikkate alınmaması bu sınırlamalar için önemli unsurlardır.

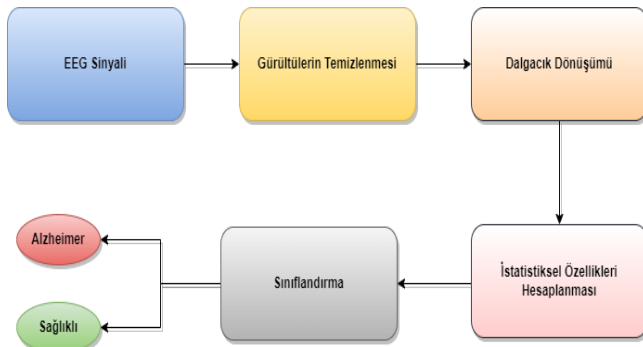
EEG tabanlı CAD uygulamalarında sinyalden doğrudan özellik çıkarımı gerçekleştirmek amacıyla çeşitli analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Dalgacık dönüşüm yönteminin sinyalin zaman frekans uzayında önemli bilgiler içeren frekans bilgilerinin analizinde kullanılan önemli bir araçtır [10]. Diğer yandan son zamanlarda birçok EEG tabanlı teşhis gerçekleştiren CAD sistemlerinde Hjorth parametrelerinin [11] kullanımı tercih edilmiş ve yüksek sınıflandırma performansı sağlanmıştır. Bunun yanında hesaplama karmaşıklığı dalgacık dönüşümünün diğer sinyal ayrıştırma yöntemlerine ve Hjorth parametrelerinin diğer özellik çıkarım yöntemlerine göre çok daha düşüktür.

Bilinen literatür çalışmalarında EEG sinyallerinde Alzheimer tespitini dalgacık dönüşümü ve Hjorth

parametreleri özelliklerinin birlikte kullanılmasıyla gerçekleştiren bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu motivasyonla EEG sinyallerinden otomatik olarak Alzheimer teşhisini yüksek doğrulukla gerçekleştirebilen, sinyalin zaman-frekans ve genlik uzayında analizini sağlayan bir CAD sistemi önerilmektedir.

Materyal Metot

Bu bölümde EEG veri setinin tanımı, ön işlem aşamaları ve sunulan analiz yönteminin adımları sunulmaktadır. Şekil 1' de EEG sinyallerinden otomatik AD tespiti için önerilen yöntemin akış diyagramı sunulmaktadır. Bu çalışma şu aşamaları içermektedir: (i) EEG sinyalinden gürültülerin Çok Ölçekli Temel Bileşen Analizi (MSPCA) yöntemiyle temizlenmesi. (ii) Her bir EEG kanalından alınan verilerin Dalgacık Dönüşümü yönteminin uygulanması. (iii) İstatistiksel özelliklerin hesaplanması. (iv) Önerilen yöntemin doğruluğunun kNN algoritması ile sınıflandırılarak test edilmesi. (vi) Dalgacık dönüşümü ile elde edilen frekans bantlarının Alzheimer hastalığının ayırt edilmesindeki sınıflandırma performansının test edilmesi. Çalışmanın tüm deneysel aşamaları Matlab yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Önerilen yöntemin aşamalarını içeren akış diyagramı

Veri Seti

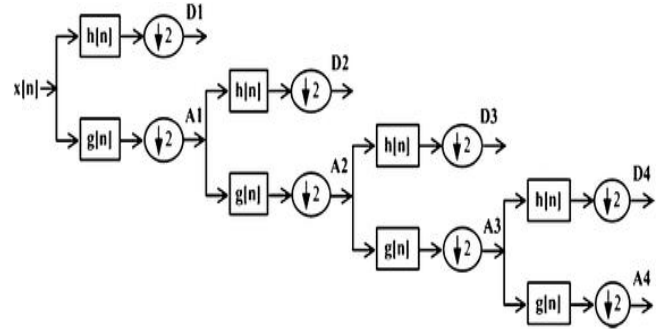
Bu çalışmada kullanılan EEG veri seti Florida Eyalet Üniversitesi araştırmacıları tarafından uluslararası 10-20 sistemine göre Biologic Systems Brain Atlas III Plus workstation kullanan 19 elektrota sahip bir kaydedici ile kaydedilmiştir. Kayıtlar dört grubu (A, B, C, D) içeren kayıtlar iki dinlenme durumu altında gerçekleştirilmiştir. A ve C gruplarının gözleri görsel olarak sabitlenerek gözleri açık olarak kaydedilmiştir. B ve D grupları ise gözleri kapalı olarak kaydedilmiştir. A ve B grupları 24 sağlıklı yaşlıdan oluşan (yaşları 61-83 aralığında ve ortalama yaşı 72) ve herhangi bir nörolojik rahatsızlık geçirmeyen deneklerden oluşmaktadır. C ve D grupları ise Ulusal Nörolojik ve İletişimsel Bozukluklar ve İnme Enstitüsü (NINCDS) ve Alzheimer Hastalığı ve İlişkili Bozukluklar Derneği (ADRDA) tarafından teşhis edilen 24 olası AD hastasından (yaşları 53-85 yaş aralığında ve ortalama yaş 69) oluşmaktadır. EEG kayıtları 1-30Hz frekans aralığında sınırlandırılmış ve 8 saniye süreli kayıtlardan oluşmaktadır. Kayıtların örnekleme frekansı 128Hz alınarak gerçekleştirilmiştir. Hastanın uyanıklık durumunun kontrol edilmesi amacıyla kayıt süresince bir

teknisyen görevlendirilmiştir. Bu EEG veri seti açık kaynak olarak erişime sunulmuştur [12].

MSPCA, Temel Bileşen Analizi (PCA) ve Dalgacık Dönüşümü yöntemlerinin önemli özelliklerini bir araya getiren bir analiz yöntemidir. MSPCA değişen sinyalin analizi veya gürültülerin temizlenmesi amacıyla çok ölçekli yapısı nedeniyle tercih edilmektedir [13]. EEG kaydı süresince kas, göz hareketi, elektrik hattı ve diğer cihazlarla etkileşimden kaynaklanan gürültüler oluşabilmektedir. Önerilen çalışmada EEG üzerindeki gürültülerin giderilmesi amacıyla her bir elektrottan alınan EEG verilerine MSPCA yöntemi uygulanmıştır. MSPCA yöntemi uygulanırken dalgacık dönüşümü fonksiyonu 'sym4' ve seviye 5 alınarak parametreler belirlenmiştir.

Dalgacık Dönüşümü

Dalgacık dönüşümü, biyomedikal sinyallerin [10], [14] zaman-frekans analizi için, özellikle durağan olmayan özelliklerinden dolayı EEG sinyal analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Dalgacık dönüşümü, düşük frekanslar için geniş zaman pencereleri ve daha yüksek frekanslar için kısa zaman pencereleri kullanır, bu da iyi bir zaman-frekans analizi sağlar. Bir sinyalin dalgacık dönüşüm ayrıştırması, zaman serisinin ve 2 aşağı örnekleme oranının ardışık yüksek geçiş ve düşük geçiş filtrelemesini kullanır. Yüksek geçiş filtresi $g(n)$ ayrık ana dalgacıktır ve düşük geçiş filtresi $h(n)$ onun aynasıdır. İlk yüksek geçiş ve düşük geçiş filtrelerinin çıktısı, sırasıyla A1 ve D1 ile temsil edilen yaklaşıklık ve ayrıntılı katsayılar olarak adlandırılır. A1 daha da parçalanır ve prosedür belirtilen sayıda ayrışma seviyesine ulaşılan kadar tekrarlanır (Bakınız Şekil 2) [14], [15].



Şekil 2. Dalgacık dönüşümü ayrıştırma süreci [15]

Genişletme işlevi $\phi_j, k(n)$ düşük geçiş filtresine bağlıdır ve dalgacık işlevi $\psi_j, k(n)$ aşağıdaki gibi gösterilen yüksek geçiş filtresini takip eder.

$$\phi_j, k(n) = 2^{j/2} h(2^j n - k) \quad (1)$$

$$\psi_j, k(n) = 2^{j/2} g(2^j n - k) \quad (2)$$

burada $n = 0, 1, 2, \dots, M-1$; $j = 0, 1, 2, \dots, J-1$; $k = 0, 1, 2, \dots, 2^j - 1$; $J = \log_2(M)$; ve M , sinyalin uzunluğudur [16].

Maksimum ayrışma seviyesi, verilen sinyaldeki temel frekans bileşenlerine bağlı olarak belirlenir. Dalgacık Dönüşümünün katsayıları, orijinal zaman serisinin nokta çarpımı ve belirlenmiş temel fonksiyonları olarak adlandırılır. Yaklaşık katsayılar A i (Denklem 3) ve i.

seviyedeki ayrıntılı katsayılar D_i (Denklem 4) olarak gösterilir:

$$A_i = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_n x(n) \times \varphi_j, k(n) \quad (3)$$

$$D_i = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_n x(n) \times \psi_j, k(n) \quad (4)$$

Burada $k = 0, 1, 2, \dots, 2j-1$ ve M , ayrıık noktalarda EEG zaman serisinin uzunluğudur [10]. Sunulan çalışmada EEG sinyallerine daubechies (db8) ana dalgacık fonksiyonu uygulanarak dalgacık dönüşümü işlemi gerçekleştirilmiştir.

İstatistiksel Özelliklerin Hesaplanması

Hjorth parametreleri, 1970 yılında zaman alanındaki EEG sinyalini tanımlamak için üç parametreden oluşan bir set sundu [11]: Aktivite, sinyal gücüdür (geniş bant filtreli); Hareketlilik, ortalama frekanstır ve Karmaşıklık, frekanstaki değişimdir. Dalgacık dönüşümü uygulanan her bir EEG kanalından alınan sinyaller üzerinden Hjorth parametreleri Alzheimer ve sağlıklı deneklerin ayırt edilmesinde özellik olarak kullanılmıştır.

Aktivite: Aktivite parametresi, bir zaman fonksiyonunun sinyal gücünü ve varyansını gösteren parametredir. Frekans alanındaki güç spektrumunun yüzeyini gösterebilir. Aşağıdaki Denklem (5) aktiviteyi temsil eder:

$$Activity = var(x(t)) \quad (5)$$

Hareketlilik: Spektrum gücünün ortalama frekansı veya standart sapma oranı, hareketlilik parametresi [15] ile temsil edilir. Hareketlilik, $x(t)$ sinyalinin birinci türevinin varyansının karekökünün, $x(t)$ sinyalinin varyansına oranı olarak tanımlanır ve denklem (6)'da sunulur:

$$Mobility = \sqrt{var(dx(t)/dt)^{-1} var(x(t))^{-1}} \quad (6)$$

Karmaşıklık: Karmaşıklık parametresi frekanstaki değişimi temsil eder. Sinyalin ilk türevinin hareketliliğinin sinyal hareketliliğine oranına karmaşıklık denir. Denklem (7)'de verilen:

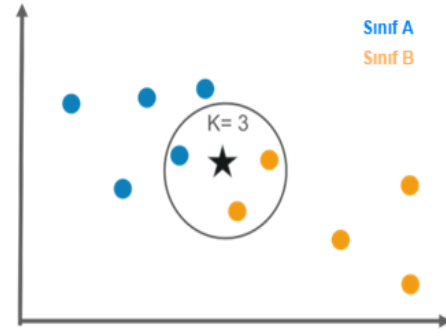
$$Complexity = (\sigma_s'' (\sigma_s')^{-1}) (\sigma_s' (\sigma_s)^{-1})^{-1} \quad (7)$$

k-En Yakın Komşu Algoritması

k-En Yakın Komşu sınıflandırıcısı [17], belirli bir veri noktasını komşularının çoğuna göre sınıflandıran parametrik olmayan bir yaklaşımdır. KNN algoritması, yürütmesini iki adımda tamamlar, ilk önce en yakın komşuların sayısını bulur ve ikincisi, birinci adımı kullanarak veri noktasını belirli bir sınıfa sınıflandırır. Komşuyu bulmak için denklem 8'de verilen Öklid mesafesi gibi uzaklık ölçütlerini kullanır.

$$Distance(x, y) = \sqrt{\sum_i (x_i - y_i)^2} \quad (8)$$

Eğitim setinden en yakın k örneğini seçer, daha sonra belirsizliği önlemek için k 'nin tek bir sayı olması gereken sınıflarının çoğunluk oyu alır. Şekil 3, kNN sınıflandırıcısının mimarisini göstermektedir. Sınıf A ve sınıf B olmak üzere sınıflar vardır. Mavi daireler sınıf A'ya ve sarı daireler sınıf B'ye gösterir. k değeri 3 olarak seçilmiştir ve en yakın 3 komşu arasından 1 örnek sınıf A'ya ve 2 örnek sınıf B'ye aittir. kNN sınıflandırıcısı, tanımlanan k 'de oyların çoğunluğu ile sınıfa yeni bir örnek verme ilkesine göre çalışır. Böylece yeni test örneği, sınıf 1'e atanır.



Şekil 3. kNN sınıflandırıcısının mimarisini

Bu bölümde önerilen yöntemle hesaplanan özelliklerin kNN öğrenme algoritması ile sınıflandırılması işlemi gerçekleştirilmiştir.

Sınıflandırma için kullanılan k değerleri deneysel olarak ($k=1 \dots 50$ arası değerler için) test edilmiş ve en yüksek sınıflandırma doğruluğu $k=3$ değeri için 91.12% olarak elde edilmiştir. Sınıflandırma sürecinde çapraz doğrulama 10 alınarak gerçekleştirilmiştir. En yakın komşu arama algoritması olarak doğrusal arama algoritması kullanılmış, mesafe fonksiyonu olarak da Öklid mesafe fonksiyonu kullanılmıştır.

Önerilen yöntemde kNN sınıflandırıcısı, uygulaması basit ve anlaşılması sezgisel olması, sınıflandırma için eğitim süresi gerektirmemesi, k değerinin ayarlanabilir olması, sürekli olarak yeni verilerle gelişmeye açık olması, tek bir hiper parametreye sahip olması, mesafe fonksiyonunun seçilebilir olması yönleriyle tercih sebebi olmuştur.

Değerlendirme Metrikleri

Sunulan çalışmada sınıflandırıcı performansının değerlendirilmesi amacıyla gerçek pozitifler (TP rate), yanlış pozitifler (FP rate), hassasiyet (precision), geri çağırma (recall), f-ölçütü, matthews korelasyon katsayısı (MCC), ROC alanı, doğruluk ve karmaşıklık matrisi olmak üzere toplam dokuz değerlendirme metriği hesaplanmıştır. Sınıflandırma performansının görselleştirilmesi amacıyla duyarlılık ve özgüllük değerleri arasındaki ROC alanı çizdirilmiştir. ROC alanının yüksek olması sınıflandırıcısının sınıfları doğru olarak tahmin ettiğini göstermektedir. Yani bir sınıflandırıcının hasta ve sağlıklı bireyin ayırt edilmesinde yüksek bir doğruluk sağlaması ROC eğrisi altındaki alanın yüksek olmasını gerektirir. Bu nedenle çalışmada önerilen yöntemin doğruluğunu açıkça ortaya koymak adına ROC eğrisi çizdirilerek ROC altındaki alan (AUC-ROC) değerlendirme metrikleri hesaplanmıştır. Karmaşıklık matrisinde bulunan doğru negatifler (TN), gerçek pozitifler (TP), yanlış pozitifler (FP) ve yanlış negatifler (FN) parametreleri kullanılarak değerlendirme metrikleri hesaplanabilmektedir. Gerçek sınıflara karşılık doğru veya yanlış tahminlerin sayısal olarak ifade edilmesi amacıyla karmaşıklık matrisi kullanılmaktadır. Önerilen yöntemde kullanılan değerlendirme metriklerine ait hesaplamalar aşağıdaki denklemlerde gösterilmektedir.

$$Doğruluk = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \times 100 \quad (9)$$

$$Geri \text{ Çağırma} = \frac{TP}{TP+FN} \times 100 \quad (10)$$

$$\text{Özgüllük} = \frac{TN}{TN+FP} \times 100 \quad (11)$$

$$Hassasiyet = \frac{TP}{TP+FP} \times 100 \quad (12)$$

$$F1 \text{ Ölçütü} = 2 * \frac{\text{hassasiyet} * \text{geri çağırma}}{\text{hassasiyet} + \text{geri çağırma}} \times 100 \quad (13)$$

$$MCC = \frac{(TP \times TN) - (FP \times FN)}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP) + (TN + FN)}} \quad (14)$$

Karmaşıklık matrisi (Bakınız Şekil 4) hata matrisi olarak bilinmektedir. Matrisin her satırı tahmin edilen bir sınıftaki örnekleri temsil ederken her sütun ise gerçek bir sınıftaki örnekleri temsil etmektedir. Sınıflandırma işlemlerinde yoğun olarak kullanılan karmaşıklık matrisi, sınıflandırmanın doğruluğunu test etmek amacıyla kullanılan bir performans değerlendirme metriğidir.



Şekil 4. Karmaşıklık matrisi

Deneysel Sonuçlar

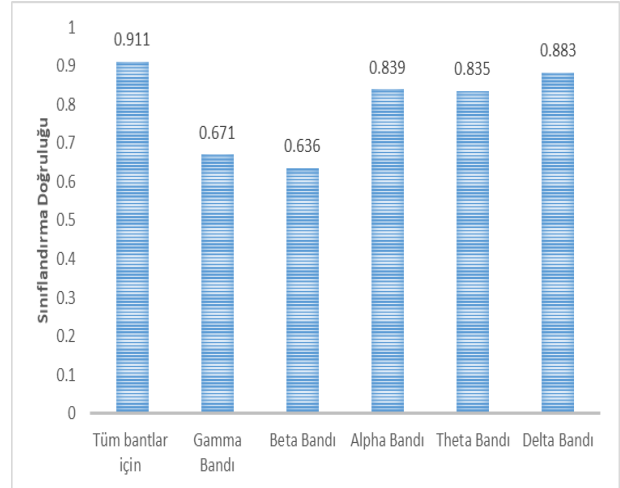
Her bir EEG kanalından alınan verilere öncelikle MSPCA yöntemi uygulanarak gürültüler temizlenmiştir. Sonrasında dalgacık dönüşümü yöntemiyle ile sinyal alt bantlarına ayrılmıştır. Sonrasında her bir alt banttan istatistiksel özellik çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında her bir alt banda ait özellikler ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda her deneğe ait her bir kanaldan alınan veri için toplam 3 özellik elde edilmiştir. Her bir Alzheimer hastası ve sağlıklı kontrol için (19 kanal sayısı x 3 her bir kanal için elde edilen özellik sayısı) uzunluklu bir vektör elde edilmiştir. Sonuçta tüm denekler için toplam uzunluğu (48 denek sayısı x 19 kanal sayısı) olmak üzere 912x3 boyutuna sahip bir matris elde edilmiştir. Tüm frekans bantlarından elde edilen bu özelliklerin kNN algoritması ile sınıflandırılmasıyla 91.12% sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir.

Tablo 1'de tüm alt bantlara ait özelliklerin ve her bir frekans bandına ait özelliklerin kNN algoritması ile sınıflandırılmasıyla elde edilen değerlendirme metrikleri gösterilmektedir.

Tablo 1. kNN algoritması ile gerçekleştirilen sınıflandırma sonucunda elde edilen değerlendirme metrikleri

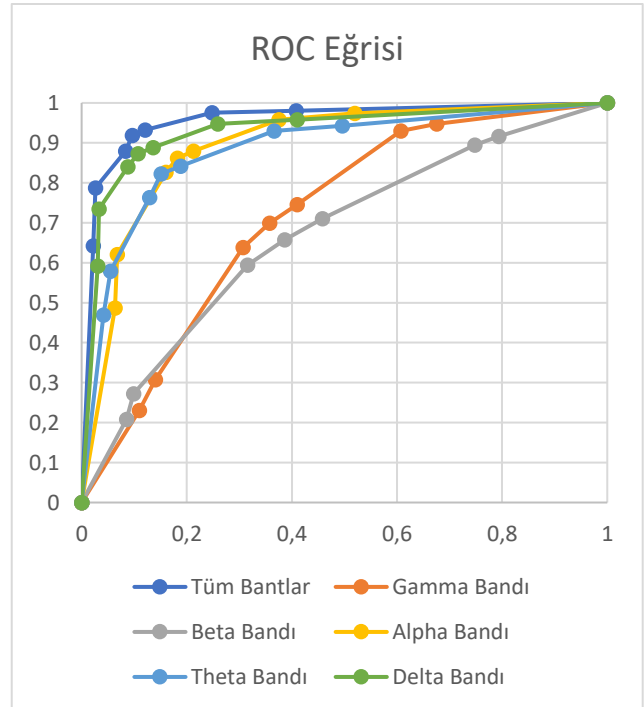
	TP Oran	FP Oran	Hassasiyet	Geri Çağırma	F-Ölçütü	MCC	ROC Alanı	Doğruluk
Tüm bantlar için	0.911	0.089	0.911	0.911	0.911	0.822	0.956	0.911
Gamma Bandı	0.671	0.329	0.672	0.671	0.671	0.343	0.717	0.671

Beta Bandı	0.636	0.364	0.636	0.636	0.636	0.272	0.671	0.636
Alpha Bandı	0.840	0.160	0.841	0.840	0.840	0.680	0.893	0.839
Theta Bandı	0.836	0.164	0.836	0.836	0.835	0.671	0.884	0.835
Delta Bandı	0.883	0.117	0.883	0.883	0.883	0.765	0.930	0.883



Şekil 5. Frekans bantlarından ve tüm frekans bileşenlerine ait özelliklerden elde edilen doğruluk değerleri

Şekil 5'de önerilen yöntemle, tüm frekans bileşenlerine ait özelliklerin ve frekans bantlarına ait özelliklerin kNN sınıflandırıcı kullanılarak sınıflandırılmasıyla elde edilen sınıflandırma doğruluklarının grafiği gösterilmektedir.



Şekil 6. Sınıflandırma işlemi sonucu elde edilen ROC eğrisi

Literatürde sınıflandırma performansını değerlendirmek için kullanılan en yaygın metriklerden biride ROC eğrisidir. Bu çalışmada önerilen yöntemin sınıflandırma doğruluğunu daha net olarak ifade edebilmek adına Şekil 6'da önerilen yöntem ile farklı frekans bantları için elde edilen ROC eğrisi oluşturulmuştur. Şekil 6'daki ROC eğrisi kNN sınıflandırıcısı ile sınıflandırma sonucu elde edilen metriklere göre oluşturulmuştur. Şekil 6 incelendiğinde tüm bantlardan alınan özelliklerin sınıflandırılmasıyla elde edilen sınıflandırma performansı frekans bantları düzeyinde elde edilen sınıflandırma performansına göre daha yüksek bir AUC-ROC değerine (95.6%) sahip olduğu görülmektedir.

		Gerçek Değerler	
		Sağlıklı	Alzheimer
Tahmin Değerler	Sağlıklı	419 (91.88%)	37 (8.12%)
	Alzheimer	44 (9.65%)	412 (90.35%)

Şekil 7. Önerilen yöntemle elde edilen karmaşıklık matrisi

Çalışmada ayrıca önerilen yöntemle elde edilen karmaşıklık matrisi de değerlendirilmiştir ve sonuçlar Şekil 7'de gösterilmektedir. Önerilen yöntemle sağlıklı kontrollerin doğru tahmini 91.88% iken Alzheimer hastalarının doğru tahmini 90.35% olarak elde edilmiştir. Aynı şekilde sağlıklı kontrollerin yanlış tahminin 8.12% iken Alzheimer hastalarının yanlış tahmini 9.65% olarak hesaplanmıştır. Bu durumda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda tüm değerlendirme metriklerinin oldukça yüksek bir değere sahip olması önerilen yöntemin Alzheimer hastaları ve sağlıklı kontrollerin ayırt edilmesinde başarılı olduğunu ortaya koymaktadır. Frekans bantlarına göre ise sınıflandırma başarımları incelendiğinde en yüksek sınıflandırma performansının delta bandı ile elde edildiği görülmektedir. Bu durum Alzheimer hastası ve sağlıklı bireylerin ayırt edilmesinde düşük frekans bileşenlerinin daha anlamlı bilgiler taşıdığını açıkça göstermektedir.

Tartışma

Sağlık sektöründeki olumlu gelişmeler dünya nüfusunun daha sağlıklı ve uzun bir hayat sürmesine imkân sağlamaktadır. Ancak demans gibi istenmeyen hastalıklarının sayısının artması istenmeyen sonuçlara sebep olmaktadır [5], [6], [18]–[22]. Alzheimer hastalığının henüz tam kesin bir tedavisi olmamakla beraber hastalığın erken teşhisi süreci yavaşlatarak yaşam kalitesinin artırılması sağlanabilir [23]. Hastalığın teşhisi nörolojik ve psikiyatrik muayene, kan analizi, bilgisayarlı tomografi gibi bir çok tıbbi işlem gerektirmesinin yanında bu işlemlerden elde edilen sonuçların uzman tarafından kapsamlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir [21]. Bütün bu zorlu teşhis süreçlerine ek olarak deneyimli

uzmanların bile vakaların 10-15% 'inde başarısız olduğu belirtilmektedir [22], [24]. Tüm bu nedenlerden dolayı sadece biyomedikal sinyallerin veya görüntüler kullanılarak CAD sistemlerin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Biyomedikal görüntüleme (CT, fMRI, PET gibi) yöntemlerin yüksek maliyet ve zaman gerektirmesinin yanında EEG sinyallerinin daha düşük maliyet ve zaman gerektirmesi çalışmamızda tercih sebebi olmuştur.

Tablo 2'de EEG sinyalleri kullanarak Alzheimer teşhisi gerçekleştiren ilgili literatür çalışmaları gösterilmektedir.

Kulkarni ve arkadaşları [4], sundukları çalışmada Alzheimer hastalığını teşhis etmek amacıyla EEG sinyallerinden farklı özellik değerleri hesaplayarak elde ettikleri özellikleri Destek Vektör Makinaları (SVM) sınıflandırıcısı ile sınıflandırmışlardır. Sundukları çalışmada en yüksek sınıflandırma karmaşıklık özellikleri ile 96% olarak elde etmişlerdir. Bir başka çalışmada ise Bairagi [1], farklı özellik değerlerini SVM ve KNN sınıflandırıcısı ile sınıflandırmıştır. Çalışmalarında en yüksek performansı 94% olarak hesapladıkları spektral özellikleri SVM sınıflandırıcısı ile sınıflandırarak elde etmişlerdir. Ruiz-Gómez ve arkadaşları [5], önerdikleri çalışmada farklı özellik değerlerini birleştirerek bunları farklı sınıflandırıcılar ile test etmişlerdir. Önerdikleri yöntemle MLP ve QDA algoritmaları ile 78.43% sınıflandırma başarımları gerçekleştirmişlerdir. Bir diğer çalışmada ise Amezcua-Sanchez ve arkadaşları [6], sundukları MUSIC-EWT isimli yöntemleriyle gerçekleştirdikleri sinyal analizi sonucunda Hurst üs ölçüleri ve Fraktal boyut özelliklerini hesaplayarak hastalığı en yüksek EPNN sınıflandırıcı ile 90.2% doğrulukla tespit etmişlerdir. Kulkarni bir diğer çalışmasında [7], EEG sinyalinden hesapladıkları spektral ve karmaşıklık özellikleri birleştirerek bunları kNN algoritması ile sınıflandırarak Alzheimer hastası ve sağlıklı kontrolleri 94% doğrulukla ayırt edebilmiştir. Tzamourta ve arkadaşları [8], sundukları çalışmalarında en yüksek sınıflandırma başarımlarını hesapladıkları istatistiksel ve spektral özellikleri Rastgele Orman algoritması ile sınıflandırarak 88.79% olarak elde etmişlerdir.

Yukarıda bahsedilen makine öğrenme tabanlı Alzheimer teşhisi gerçekleştiren çalışmaların tamamında fazla istatistiksel özellikler ve yüksek hesaplama karmaşıklığına sahip yöntemler önerilmiştir. Ancak bu çalışmada sadece üç istatistiksel özelliğin (Hjorth Parametreleri) kNN sınıflandırıcısı (basit ağ yapısına sahip olması ve eğitim gerektirmemesinden dolayı) ile sınıflandırılmasıyla oldukça tatmin edici sınıflandırma başarımları elde edilmiştir.

Çalışmanın sonraki çalışmalarda telafi edilebileceği sınırlamalarında en önemlisi farklı ensemble algoritmaların tercih edilerek sınıflandırma performansının daha fazla artırılabilir olmasıdır. Ancak çalışmada özellikle kNN sınıflandırıcısının tercih edilmesinin başlıca nedeni eğitim aşamasına ihtiyaç duymaması ve daha az hesaplama karmaşıklığına sahip olmasıdır.

Dalgacık dönüşümü literatürde üstün sinyal analiz yeteneklerinden dolayı EEG sinyallerinin zaman-frekans analizinde sıkça kullanılmaktadır. Bu çalışmada EEG sinyallerinden Alzheimer hastası ve sağlıklı kontrollerin yüksek doğrulukla ayırt edilebilecek, dalgacık dönüşümü ve Hjorth parametrelerini birlikte kullanan bir CAD sistemi sunulmaktadır. Çalışmada kullanılan veri seti ile henüz makine öğrenme tabanlı bir çalışma sunulmamıştır. Bu yönüyle çalışma başka bir çalışma ile karşılaştırılmamaktadır. Önerilen yöntemle yüksek sınıflandırma başarımı elde edilmesinin yanında hesaplama karmaşıklığı olarak da oldukça yüksek bir performansa sahiptir.

Tablo 2. Önerilen yöntemin diğer literatür çalışmalarıyla karşılaştırılması

Referans	Sınıflandırıcı	EEG Veri seti	Özellik Çıkarım	Doğruluk
Kulkarni ve ark. [4]	SVM	50 sağlıklı +50 Alzheimer	Karmaşık özellikleri	96%
Bairagi [1]	SVM	50 sağlıklı +50 Alzheimer	Spektral özellikler	94%
Ruiz-Gómez ve ark. [5]	MLP	37 sağlıklı +37 hafif bilişsel bozukluk) + 37 Alzheimer	Spektral ve lineer olmayan özellikler	78.43%
Amezquita-sanchez ve ark.[6]	EPPN	37 hafif bilişsel bozukluk + 37 Alzheimer	Hurst üs ölçüleri ve fraktal boyut	90.3%
Kulkarni [7]	kNN	50 sağlıklı +50 Alzheimer	Spektral ve karmaşık özellikleri	94%
Tzamourta ve ark.[8]	Rastgele Orman	10 sağlıklı + 8 hafif düzey Alzheimer +6 orta düzey Alzheimer	İstatistiksel ve spektral özellikler	88.79%
Önerilen Yöntem	kNN	24 sağlıklı + 24 AD	Dalgacık Dönüşümü ve Hjorth parametreleri	91.12%

Sonuçlar

Bu çalışma ile EEG kayıtlarından Alzheimer hastaları ve sağlıklı kontrollerin sağlam bir şekilde ayırt edilmesine imkân sağlayan dalgacık dönüşümü ve Hjorth parametrelerinin hibrit olarak kullanıldığı yaklaşıma dayalı bir CAD sistemi sunulmaktadır. Ayrıca çalışmada farklı frekans bantları ile elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Hastalığın teşhisi maliyetli testler ve bu testlerin bir uzman tarafından değerlendirilmesi gibi yorucu ve zaman alan bir süreç içermektedir. Ayrıca bu testlerin değerlendirilmesi mesleki deneyime önemli ölçüde bağlı olduğu için bazı durumlarda tutarsız değerlendirmelere yol açabilir. Bu nedenle önerilen

çalışma ile hastalığın makine öğrenme algoritmalarıyla tespitini gerçekleştiren bir model geliştirilmiştir. Sunulan yöntemle elde edilen yüksek sınıflandırma başarımı ile Alzheimer ve sağlıklı kontrollerin ayırt edilmesinde uzman görüşüne destek sağlayacağı düşünülen oldukça tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1] V. Bairagi, "EEG signal analysis for early diagnosis of Alzheimer disease using spectral and wavelet based features," *Int. J. Inf. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 403–412, 2018.
- [2] L. R. Trambaioli, N. Spolaôr, A. C. Lorena, R. Anghinah, and J. R. Sato, "Feature selection before EEG classification supports the diagnosis of Alzheimer's disease," *Clin. Neurophysiol.*, vol. 128, no. 10, pp. 2058–2067, 2017.
- [3] R. H. Blank, "Alzheimer's Disease and Other Dementias: An Introduction," in *Social & Public Policy of Alzheimer's Disease in the United States*, Springer, 2019, pp. 1–26.
- [4] N. N. Kulkarni and V. K. Bairagi, "Extracting salient features for EEG-based diagnosis of Alzheimer's disease using support vector machine classifier," *IETE J. Res.*, vol. 63, no. 1, pp. 11–22, 2017.
- [5] S. J. Ruiz-Gómez et al., "Automated multiclass classification of spontaneous EEG activity in Alzheimer's disease and mild cognitive impairment," *Entropy*, vol. 20, no. 1, p. 35, 2018.
- [6] J. P. Amezcua-Sanchez, N. Mammone, F. C. Morabito, S. Marino, and H. Adeli, "A novel methodology for automated differential diagnosis of mild cognitive impairment and the Alzheimer's disease using EEG signals," *J. Neurosci. Methods*, vol. 322, pp. 88–95, 2019.
- [7] N. Kulkarni, "Use of complexity based features in diagnosis of mild Alzheimer disease using EEG signals," *Int. J. Inf. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 59–64, 2018.
- [8] K. D. Tzamourta et al., "EEG window length evaluation for the detection of Alzheimer's disease over different brain regions," *Brain Sci.*, vol. 9, no. 4, p. 81, 2019.
- [9] M. S. Safi and S. M. M. Safi, "Early detection of Alzheimer's disease from EEG signals using Hjorth parameters," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 65, p. 102338, 2021.
- [10] U. Orhan, M. Hekim, and M. Ozer, "EEG signals classification using the K-means clustering and a

- multilayer perceptron neural network model,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 10, pp. 13475–13481, 2011.
- [11] B. Hjorth, “EEG analysis based on time domain properties,” *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 29, no. 3, pp. 306–310, 1970.
- [12] A. M. Pineda, F. M. Ramos, L. E. Betting, and A. S. L. O. Campanharo, “Quantile graphs for EEG-based diagnosis of Alzheimer’s disease,” *PLoS One*, vol. 15, no. 6, p. e0231169, 2020.
- [13] B. R. Bakshi, “Multiscale PCA with application to multivariate statistical process monitoring,” *AIChE J.*, vol. 44, no. 7, pp. 1596–1610, 1998.
- [14] P. Jahankhani, V. Kodogiannis, and K. Revett, “EEG signal classification using wavelet feature extraction and neural networks,” in *IEEE John Vincent Atanasoff 2006 International Symposium on Modern Computing (JVA’06)*, 2006, pp. 120–124.
- [15] H. U. Amin et al., “Feature extraction and classification for EEG signals using wavelet transform and machine learning techniques,” *Australas. Phys. & Eng. Sci. Med.*, vol. 38, no. 1, pp. 139–149, 2015.
- [16] R. C. Gonzalez, *Digital image processing*. Pearson education india, 2009.
- [17] N. S. Altman, “An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression,” *Am. Stat.*, vol. 46, no. 3, pp. 175–185, 1992.
- [18] W. H. Organization and others, *Dementia: a public health priority*. World Health Organization, 2012.
- [19] J. Jeong, “EEG dynamics in patients with Alzheimer’s disease,” *Clin. Neurophysiol.*, vol. 115, no. 7, pp. 1490–1505, 2004.
- [20] C. Patterson and others, “World alzheimer report 2018,” 2018.
- [21] J. Dauwels, F. Vialatte, and A. Cichocki, “Diagnosis of Alzheimer’s disease from EEG signals: where are we standing?,” *Curr. Alzheimer Res.*, vol. 7, no. 6, pp. 487–505, 2010.
- [22] A. Alberdi, A. Aztiria, and A. Basarab, “On the early diagnosis of Alzheimer’s Disease from multimodal signals: A survey,” *Artif. Intell. Med.*, vol. 71, pp. 1–29, 2016.
- [23] R. Cassani, M. Estarellas, R. San-Martin, F. J. Fraga, and T. H. Falk, “Systematic review on resting-state EEG for Alzheimer’s disease diagnosis and progression assessment,” *Dis. Markers*, vol. 2018, 2018.
- [24] B. Oltu, M. F. Ak\csahin, and S. Kibaro\uglu, “A novel electroencephalography based approach for Alzheimer’s disease and mild cognitive impairment detection,” *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 63, p. 102223, 2021.
- [25] S. Buyrukoğlu, Y. Yılmaz , & Z. Topalcengiz, “Correlation value determined to increase Salmonella prediction success of deep neural network for agricultural waters,” *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(5), 1-12, 2022
- [26] S. Buyrukoğlu, & S. Savaş, “Stacked-Based Ensemble Machine Learning Model for Positioning Footballer”. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-13, 2022.
- [27] R. Halde, “Application of Machine Learning algorithms for betterment in education system”. In *2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)* (pp. 1110-1114). IEEE, 2016.
- [28] S. BUYRUKOĞLU, “Early detection of alzheimer’s disease using data mining: comparison of ensemble feature selection approaches”, *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 50-61,2021.
- [29] S. Buyrukoğlu, “Improvement of Machine Learning Models’ Performances based on Ensemble Learning for the detection of Alzheimer Disease”, In *2021 6th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)* (pp. 102-106). IEEE, 2021.



Bagging and Boosting Methods for Predicting Mortality of Patients with COVID-19

Hilal ARSLAN^{1*}

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Software Engineering Department, hilalarlanceng@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-6449-6952

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 March 2022
Received in revised form 5 May 2022
Accepted 8 May 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

COVID-19, SARS-CoV-2, Ensemble learning, Bagging, Boosting

Doi: 10.24012/dumf.1095858

* Corresponding author

ABSTRACT

COVID-19 pandemic has been going on for more than two years and an increasing number of deaths has been occurring. The mortality prediction of the COVID-19 patient is crucial to reduce the risk of imminent death as well as to apply effective clinical treatment strategy. Ensemble learning techniques are effectively employed to predict the outcome of the patients with COVID-19. In this study, we perform bagging and boosting methods to predict mortality of the patients with COVID-19. The six different decision tree methods, C4.5, Random tree, REPTree, Logistic Model Tree, Decision Stump, and Hoeffding Tree are performed for base learners in bagging and boosting. The results are obtained using a real-world dataset including information obtained from 1085 patients. Experimental results present that bagging using REPTree as a base learner achieves an accuracy of 97.24%. Furthermore, when we compare our results with other classification algorithms, the proposed method has a higher performance with respect to the accuracy, and presents an admirable performance.

Introduction

Severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 (SARS-CoV-2) belongs to a betacoronavirus family and has caused a disease known as COVID-19. COVID-19 has been announced as a worldwide pandemic and has caused many deaths worldwide. According to the World Health Organization (WHO) report published on March 15, 2022, the total number of patients who were positive in the diagnosis of COVID-19 is 458,479,635 and the number of patients who died from COVID-19 is 6,047,653. The common symptoms of the disease are tiredness, cough, fever, sore throat as well as problems in breathing and there is no proven treatment for COVID-19. Zoabi et al. [1] investigated importance of these symptoms and they reported that headache and sore throat were identified as the most important symptoms. Several studies have shown that people who have a chronic respiratory disease, older and male are more affected by COVID-19 disease. Furthermore, people with crucial medical diseases like cancer and cardiovascular illness are affected seriously from COVID-19.

After increasing transmissibility of COVID-19, several variants of SARS-CoV-2 have been emerged. The main variants of SARS-CoV-2 are the Alpha, Beta, Gamma,

Delta, and Omicron, and mRNA vaccines are effective against SARS-CoV-2 variants. Machine learning (ML) techniques are actively used in COVID-19 detection from genome sequences [2,3] and common symptoms of COVID-19 [1]. Furthermore, ML techniques are used to estimate the severity of COVID-19 infected in the patient [4]. Besides, deep learning (DL) techniques are efficiently used to predict COVID-19 from medical imaging [5,6]. DL techniques are also efficiently used to interpret clinical findings from various types of cancers [7] and biomedical studies [8].

In this study, we applied bagging and boosting methods to predict the mortality of patients with COVID-19. We used six different decision tree methods as base learners of the bagging and boosting methods. The rest of the paper is organized as follows. In Section 2, related work is summarized. In Section 3, the methods are given. In Section 4, the results are presented and compared with methods published in the literature. The last section presents conclusion as well as the future directions.

Related Work

Various types of ML and DL algorithms recently published to detect COVID-19 that can be found in [2,3,6,9-16].

Schwab et al. [17] proposed a method for predicting COVID-19 mortality from electronic health records. Deniz et al. [18] introduced a technique for predicting severity of COVID-19. They applied a multithreaded genetic algorithm to choose the optimum set of features and combine with extreme learning machine. Mydukuri et al. [19] used Gaussian neuro-fuzzy classifier to predict COVID-19. Zoabi et al. [1] employed an ML algorithm to diagnose COVID-19. They designed their methods based on basic information and symptoms without using any medical equipment. Their method achieved an auROC of 0.86. Cabitza et al. [20] evaluated five machine learning techniques on the data including blood tests. They performed various types of ML methods. They achieved satisfactory results and concluded that ML techniques based on blood tests can detect COVID-19 cases fast compared to the RT-PCR tests. Unal and Dudak [21] implemented naive bayes, SVM, KNN, and decision tree methods on the dataset including 19 features which are sex, age, the state of pneumonia as well as the state of various types of diseases such as asthma, diabetes, kidney failure, and hypertension. They showed that the SVM achieved an accuracy of 100%.

Alakus and Turkoglu [5] compared DL approaches to diagnose COVID-19 using laboratory findings. Their methods achieved an accuracy of 68.6%. Jiang et al. [22] developed a ML tool to predict patients at risk for COVID-19. They used the data containing 11 features which are blood count, hemoglobin, temperature, Na⁺, creatinine, K⁺, a liver enzyme, myalgias, gender, lymphocyte count, and age. They performed logistic regression, KNN, decision tree, and SVM classifiers. They concluded that myalgias, hemoglobin, and the liver enzyme are important features and the most predictive. Batista et al. [23] used SVM, random forest, neural network, gradient boosted trees and logistic regression to diagnose COVID-19 using laboratory findings. Their method achieved the best AUC score with 0.84 when SVM and random forest methods were used. Schwab et al. [24] evaluated predictive models using logistic regression, neural network, random forest, different SVM methods and gradient boosting using demographic, clinical and blood analysis data containing 111 features. They obtained the best performance with 66% AUC score when gradient boosting method is used. Halasz et al. [25] investigated mortality in the patients with COVID-19 pneumonia. They developed a method based on the Piacenza score and their method achieved satisfactory results. Quanjel et al. [26] used decision trees to predict COVID-19 mortality from laboratory data.

Methods

In this section, we present bagging and boosting methods applied in this study. Furthermore, we explain various types of decision tree methods used as base learners in bagging and boosting methods.

Bagging Using Decision Tree Classifiers

Bagging, a bootstrap ensemble method, generates multiple training sets using a bootstrap method [27,28]. Each training set contains N samples where N is the size of the

original training set and is created by random and repeatable distribution of the original training set. Each individual classifier is operated on different training set in parallel, and the final prediction is achieved by aggregating the predictions obtained from individual classifiers. We performed bagging method using various types of decision tree based classifiers, C4.5, Random tree, REPTree, LMT, Decision Stump, and Hoeffding Tree algorithms, respectively.

Boosting Using Decision Tree Classifiers

Boosting, an ensemble method, combines a set of weak learners to achieve a strong learner [29]. Equal weighted samples are retrieved from the training dataset, and next decision tree classifiers, C4.5, Random tree, REPTree, LMT, Decision Stump, and Hoeffding Tree are applied on this training dataset to form the first weak learner, respectively. Thus, each model copes with the weakness of its predecessor. The samples are weighted with respect to classification accuracies and the new training set is created. The process of creating weak learners using new training set is repeated until a strong classifier is achieved.

Adaptive Boosting (AdaBoost) [30] combines many weak learners into a strong one such that the weak classifiers try to improve classification of the data samples that were classified incorrectly by the previous classifier. In this study we used AdaBoost algorithm using decision tree methods. In the next sections, we briefly explain the decision tree methods used as base learners for bagging and boosting methods.

Decision Tree Methods

C4.5 [31] is among widely known decision tree methods and was introduced by Ross Quinlan [32]. We used J48, which is an implementation of C4.5 in Weka. C4.5 method uses the information gain to specify attributes for each node [31]. In Random Tree method, a decision tree is randomly selected among various number of decision trees constructed by randomly selected samples from the dataset. Logistic Model Tree (LMT) [33] combines decision trees with logistic model trees. Decision Stump [34] is a one-level decision tree. The method builds a decision tree with one internal node (the root) that is connected to its leaves. It is commonly used as a base learner in bagging and boosting. Hoeffding Tree [35,36] is an incremental decision tree technique for big data streams based on the assumption that the distribution of the data does not change with time. It expands decision tree incrementally with respect to Hoeffding bound.

Experimental Results

Data Description

The original dataset used in this study can be founded at Kaggle as "Novel Corona Virus 2019 Dataset" [37] and gathered from different sources including the WHO and John Hopkins University.

The original dataset includes some missing as well as redundant values. Therefore, the dataset was preprocessed

by Deniz et al. [18] and we used preprocessed version of it. The dataset includes information belonging to 1085 patients, and 63 out of 1085 patients are recorded as deceased. The information related to the patients includes location, country, gender, age, date that the patient has symptoms, the date that the patient visits hospital, the knowledge whether the patient visited Wuhan, and the knowledge the patient from Wuhan. The dataset also includes knowledge about the number of the days the first symptom was occurred. Furthermore, the dataset includes 24 unique symptoms listed below and includes 34 features in total.

- Abdominal pain
- Breathing difficulty
- Chest pain
- Chills
- Cold
- Cough
- Diarrhea
- Fatigue
- Fever
- Flu
- Headache
- Joint pain
- Loss of appetite
- Muscle pain
- Nausea
- Physical discomfort
- Pneumonia
- Reflux
- Runny nose
- Sneeze
- Sore throat
- Sputum
- Thirst
- Vomiting

Performance Measurements

We used precision, recall, F-measure, and accuracy values that are presented in Table 1. Precision is the ratio of the samples correctly classified as positive to the total number of samples classified as positive. Recall is the ratio of the samples correctly classified as positive to total number of positive samples. F-measure is the harmonic mean of the precision and recall, and the accuracy is the most common measure and ratio of the samples correctly classified to the total number of samples.

Table 1. Performance measures used in this study

Performance Metric	Formula
Precision	$\frac{TP}{TP + FP}$
Recall	$\frac{TP}{TP + FN}$
F-measure	$\frac{2 * Precision * Recall}{Precision + Recall}$
Accuracy	$\frac{TP + FP}{TP + FP + TN + FN}$

Results and Discussion

In this section, we show the results of bagging and boosting methods using various types of decision tree classifiers. The number of iteration is set to 10. 5-fold cross validation technique is used.

Table 2 presents precision and recall results of bagging and boosting methods using six different decision tree methods. First, we evaluate the results of AdaBoost method using

decision tree methods. AdaBoost method achieves the best precision with 97.50% when REPTree is used as a base learner. The precision of the AdaBoost method using C4.5, Random Tree, LMT, and Decision Stump as base learners are about 97%, and AdaBoost method has a precision of 94.19% when Hoeffding Tree method is used as a base learner. On the other hand, the recall values of the AdaBoost method using six different decision tree methods are close to 100%.

Second, we evaluate the results of bagging method using the decision tree methods. The precision values range from 94.19% to 97.33%, and the best precision is obtained when LMT is used as a base learner. When we look at recall results, bagging using C4.5, REPTree, LMT, and Hoeffding Tree methods achieve a recall about 100% and bagging using Random Tree and Decision Stump achieves a recall of about 99%.

Table 2. Precision and recall results of bagging and boosting methods using six different decision tree methods

Method	Precision		Recall	
	AdaBoost	Bagging	AdaBoost	Bagging
C4.5	97.40	97.15	99.02	99.90
RandomTree	97.22	97.03	99.12	99.22
REPTree	97.50	97.24	99.22	99.90
LMT	97.22	97.33	99.22	99.80
Decision Stump	96.86	95.56	99.51	99.02
000Hoeffding	94.19	94.19	100	100

Table 3. F-measure and accuracy results of bagging and boosting methods using six different decision tree methods.

Method	F-measure		Accuracy	
	AdaBoost	Bagging	AdaBoost	Bagging
C4.5	98.20	98.50	96.59	97.14
RandomTree	98.16	98.11	96.50	96.41
REPTree	98.35	98.55	96.87	97.24
LMT	98.21	98.55	96.59	97.24
Decision Stump	98.17	97.26	96.50	94.75
Hoeffding Tree	97.01	97.01	94.19	94.19

Now, we analyze F-measure and accuracy results of bagging and boosting methods shown in Table 3. First, we evaluate the F-measure and accuracy values for the Adaboost algorithm using the decision tree methods. The best F-measure value is 98.35% and achieved when the AdaBoost method using REPTree. Similarly, the AdaBoost method achieves the best accuracy that is 96.87% when the REPTree method is used. Finally, we analyze F-measure and accuracy results of bagging using the decision tree

methods. While F-measure values change from 97.01% to 98.55%, the accuracy values range from 94.19% to 97.24%. The bagging using the REPTree or LMT method achieves the best F-measure and accuracy values.

Comparison with the other state-of-the-art methods

Deniz et al. [18] reported the accuracy values of the traditional machine learning methods shown in Figure 1 on the original COVID-19 dataset. With respect to their results, the best accuracy was obtained with 90.14% when Random forest method is used.

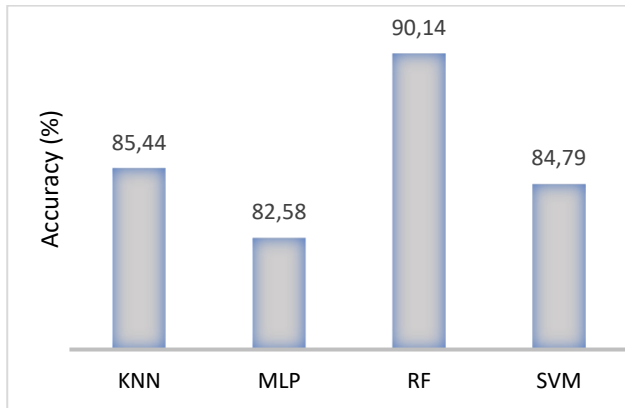


Figure 1. Results of ML methods

Figure 2 gives the accuracy results of the state-of-the-art methods on the COVID-19 dataset. Iwendi et al. [38] used Random Forest enhanced with AdaBoost algorithm. The accuracy of their method is 94.0%. Deniz et al. [18] used a multi-threaded genetic algorithm, and their method achieves an accuracy of 96.22%. Mydukuri et al. [19] applied feature selection method and they used Gaussian neuro-fuzzy classifier. The accuracy of their method is 95.0%. Too and Mirjalili [39] used Dragonfly Algorithm to select the most relevant features and their method reached an accuracy of 92.21%. When we compare our method with these methods, the proposed method achieves the highest accuracy with 97.24%.

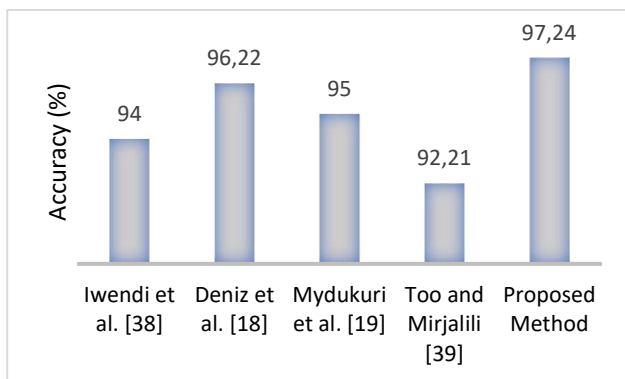


Figure 2. Accuracy results of the state-of-the-art methods

Conclusion

COVID-19 disease has caused severe and deadly complications. Determining the severity level of the patient is important to follow a better treatment strategy. In this paper, we apply bagging and boosting techniques using several types of decision tree methods on a real dataset including symptoms information as well as gender, age, and location information of the patients. Experimental results indicate that performance of the bagging method is higher than the boosting method, and bagging using REPTree as a base learner achieves an accuracy of 97.24%. This means that the information about the patients including symptoms knowledge as well as the basic information has a severe effect to predict mortality of the patients. In future studies, we plan to combine deep learning techniques with high performance techniques to predict severity level of the patients, and we will also consider the laboratory information of the patients.

Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared.

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared.

Authors' Contributions

All parts of the paper are prepared and implemented by Hilal Arslan.

References

- [1] Y. Zoabi, S. Deri-Rozov, and N. Shomron. Machine learning-based prediction of COVID-19 diagnosis based on symptoms. *npj Digital Medicine*, 4(1), 3. 2021. DOI: 10.1038/s41746-020-00372-6
- [2] H. Arslan and H. Arslan. A new covid-19 detection method from human genome sequences using cpG island features and knn classifier. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2021. DOI: 10.1016/j.jestch.2020.12.026
- [3] H. Arslan, Machine learning methods for covid-19 prediction using human genomic data, *MDPI Proceedings*, vol.74 no.1. 2021. DOI: 10.3390/proceedings2021074020
- [4] W. Shang, J. Dong, Y. Ren, M. Tian, W. Li, J. Hu and Y. Li, The value of clinical parameters in predicting the severity of COVID- 19. *Journal of Medical Virology*, 92(10), 2188–2192, 2020. DOI: 10.1002/jmv.26031
- [5] T. B. Alakus and I. Turkoglu, "Comparison of deep learning approaches to predict covid-19 infection," *Chaos, Solitons Fractals*, vol. 140, p. 110120, 2020.

- [6] M. Alazab, A. Awajan, A. Mesleh, A. Abraham, V. Jatana, and S. Alhyari, "Covid-19 prediction and detection using deep learning," *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, vol. 12, pp. 168–181, 2020.
- [7] V. Andriasyan, A. Yakimovich, F. Georgi, A. Petkidis, R. Witte, D. Puntener, and U. F. Greber, "Deep learning of virus infections reveals mechanics of lytic cells," Oct. 2019. DOI: 10.1101/798074
- [8] A. W. Senior et al. (2020). "Improved protein structure prediction using potentials from deep learning," *Nature*, vol. 577, no. 7792, pp. 706–710. DOI: 10.1038/s41586-019-1923-7
- [9] Y. Zoabi, S. Deri-Rozov, and N. Shomron, "Machine learning-based prediction of COVID-19 diagnosis based on symptoms," *npj Digital Medicine*, vol. 4, no. 1, p. 3, Dec. 2021.
- [10] L. J. Muhammad, E. A. Algehyne, S. S. Usman, A. Ahmad, C. Chakraborty, and I. A. Mohammed, "Supervised Machine Learning Models for Prediction of COVID-19 Infection using Epidemiology Dataset," *SN Computer Science*, vol. 2, no. 1, p. 11, Feb. 2021. [Online] <http://link.springer.com/10.1007/s42979-020-00394-7>
- [11] S. F. Ardabili, A. Mosavi, P. Ghamisi, F. Ferdinand, A. R. arkonyi-Koczy, U. Reuter, T. Rabczuk, and P. M. Atkinson, "COVID-19 Outbreak Prediction with Machine Learning," *Algorithms*, vol. 13, no. 10, p. 249, Oct. 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1999-4893/13/10/249>
- [12] M.-H. Tayarani N., "Applications of artificial intelligence in battling against covid-19: A literature review," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 142, p. 110338, Jan. 2021. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960077920307335>
- [13] S. Kushwaha, S. Bahl, A. Bagha, K. Parmar, M. Javaid, A. Haleem, and R. Singh, "Significant applications of machine learning for covid-19 pandemic," *Journal of Industrial Integration and Management*, vol. 5, no. 4, Dec. 2020.
- [14] F. De Felice and A. Polimeni, "Coronavirus Disease (COVID-19): A Machine Learning Bibliometric Analysis," *In Vivo*, vol. 34, no. 3 suppl, pp. 1613–1617, 2020. [Online]. Available: <http://iv.iiarjournals.org/lookup/doi/10.21873/invivo.11951>
- [15] H. Arslan, "COVID-19 prediction based on genome similarity of human SARS-CoV-2 and bat SARS-CoV-like coronavirus," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 161, p. 107666, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107666>
- [16] H. Arslan and B. Aygün, "Performance analysis of machine learning algorithms in detection of covid-19 from common symptoms," in *2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2021, pp. 1–4.
- [17] P. Schwab, A. Mehrjou, S. Parbhoo, L. A. Celi, J. Hetzel, M. Hofer, B. Scholkopf, and S. Bauer, "Real-time prediction of COVID-19 related mortality using electronic health records," *Nature Communications*, vol. 12, no. 1, Feb. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20816-7>
- [18] A. Deniz, H. E. Kiziloz, E. Sevinc, and T. Dokeroglu, "Predicting the severity of covid-19 patients using a multi-threaded evolutionary feature selection algorithm," *Expert Systems*, Feb. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/exsy.12949>
- [19] R. V. Mydukuri, S. Kallam, R. Patan, F. Al-Turjman, and M. Ramachandran, "Deming least square regressed feature selection and gaussian neuro-fuzzy multi-layered data classifier for early COVID prediction," *Expert Systems*, Mar. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/exsy.12694>
- [20] F. Cabitza, A. Campagner, D. Ferrari, C. D. Resta, D. Ceriotti, E. Sabetta, A. Colombini, E. D. Vecchi, G. Banfi, M. Locatelli, and A. Carobene, "Development, evaluation, and validation of machine learning models for covid-19 detection based on routine blood tests," *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)*, vol. 59, no. 2, pp. 421–431, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1515/cclm-2020-1294>
- [21] Y. Unal and M. N. Dudak, "Classification of covid-19 dataset with some machine learning methods," *Journal of Amasya University the Institute of Sciences and Technology*, vol. 1, pp. 30 – 37, 2020.
- [22] X. Jiang, M. Coffee, A. Bari, J. Wang, X. Jiang, J. Huang, J. Shi, J. Dai, J. Cai, T. Zhang, Z. Wu, G. He, and Y. Huang, "Towards an artificial intelligence framework for data-driven prediction of coronavirus clinical severity," *Computers, Materials & Continua*, vol. 62, no. 3, pp. 537–551, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32604/cmc.2020.010691>
- [23] A. F. de Moraes Batista, J. L. Miraglia, T. H. R. Donato, and A. D. P. C. Filho, "COVID-19 diagnosis prediction in emergency care patients: a machine learning approach," Apr. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1101/2020.04.04.20052092>
- [24] P. Schwab, A. D. Schütte, B. Dietz, and S. Bauer, "Clinical predictive models for COVID-19: Systematic study," *Journal of Medical Internet*

- Research*, vol. 22, no. 10, p. e21439, Oct. 2020. [Online]. DOI: 10.2196/21439
- [25] Halasz, G., Sperti, M., Villani, M., Michelucci, U., Agostoni, P., Biagi, A., Rossi, L., Botti, A., Mari, C., Maccarini, M., Pura, F., Roveda, L., Nardecchia, A., Mottola, E., Nolli, M., Salvioni, E., Mapelli, M., Deriu, M. A., Piga, D., & Piepoli, M., "A Machine Learning Approach for Mortality Prediction in COVID-19 Pneumonia: Development and Evaluation of the Piacenza Score", In *Journal of Medical Internet Research*, vol. 23, issue 5, 2021. JMIR Publications Inc. DOI:10.2196/29058
- [26] Quanjel, M. J. R., van Holten, T. C., Gunst-van der Vliet, P. C., Wielaard, J., Karakaya, B., Söhne, M., Moeniralam, H. S., & Grutters, J. C. (2020). "Replication of a mortality prediction model in Dutch patients with COVID-19", In *Nature Machine Intelligence* (Vol. 3, Issue 1, pp. 23–24). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1038/s42256-020-00253-3>
- [27] L. Breiman, "Bagging predictors," *Machine Learning*, vol. 24, no. 2, pp. 123–140, Aug. 1996. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/bf00058655>
- [28] B. Efron and R. J. Tibshirani, *An Introduction to the Bootstrap*. Springer US, 1993. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-4541-9>
- [29] R. E. Schapire, "The strength of weak learnability," *Machine Learning*, vol. 5, no. 2, pp. 197–227, Jun. 1990. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/bf00116037>
- [30] R. E. Schapire and Y. Singer, *Machine Learning*, vol. 37, no. 3, pp. 297–336, 1999. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1023/a:1007614523901>
- [31] S. Ruggieri, "Efficient c4.5 [classification algorithm]," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 438–444, 2002.
- [32] J. R. Quinlan, *C4.5: Programs for Machine Learning*, 1993.
- [33] N. Landwehr, M. Hall, and E. Frank, "Logistic model trees," *Machine Learning*, vol. 59, no. 1-2, pp. 161–205, May 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10994-005-0466-3>
- [34] S. K. Jha, P. Paramasivam, Z. Pan, and J. Wang, "Decision stump and Stacking C-based hybrid algorithm for healthcare data classification," in *Cloud Computing and Security*. Springer International Publishing, 2018, pp. 205–216. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00018-919>
- [35] P. Domingos and G. Hulten, "Mining high-speed data streams," in *Proceedings of the sixth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*. ACM Press, 2000. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/347090.347107>
- [36] G. Hulten, L. Spencer, and P. Domingos, "Mining time-changing data streams," in *proc. of the 2001 acm sigkdd intl. conf. on knowledge discovery and data mining*, 2001, pp. 97–106.
- [37] "Covid-19 dataset," <https://www.kaggle.com/sudalairajkumar/novel-coronavirus-2019-dataset>, accessed: 2022-03-01.
- [38] C. Iwendi, A. K. Bashir, A. Peshkar, R. Sujatha, J. M. Chatterjee, S. Pasupuleti, R. Mishra, S. Pillai, and O. Jo, "COVID-19 patient health prediction using boosted random forest algorithm," *Frontiers in Public Health*, vol. 8, Jul. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00357>
- [39] J. Too and S. Mirjalili, "A hyper learning binary dragonfly algorithm for feature selection: A COVID-19 case study," *Knowledge-Based Systems*, vol. 212, p. 106553, Jan. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2020.106553>



Using Machine Learning Algorithms For Classifying Transmission Line Faults

Tuba TANYILDIZI AĞIR^{1*}

¹Batman University, Department of Electronics and Automation, tuba.tanyildiziagir@batman.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-3327-6970

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 March 2022
Received in revised form 14 April 2022
Accepted 14 April 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

support vector machine
k-nearest neighbors algorithm
decision tree
transmission line faults
ensemble
linear discriminant analysis

ABSTRACT

The faults in transmission lines should be identified for attaining high quality energy in electrical power systems. Savings can be made in both time and energy if the transmission line faults are classified accurately. The present study examined phase-ground, phase-phase-ground, phase-phase, phase-phase-phase and no fault cases. Support Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbours Algorithm (KNN), Decision Tree (DT), Ensemble, Linear discriminant analysis (LDA) classifiers were used for classifying the transmission line faults. These algorithms were compared with regard to parameters such as accuracy, error rate, prediction speed and training time. The accuracy and minimum error of SVM and KNN classifiers were 99.7 % and 0.0011 respectively. DT classifier is faster than the other classifiers with a predicted speed of 29000 obs/sec. Whereas LDA had the shortest training time of 0.76992 sec. The results have indicated that SVM, KNN classifiers have similar performances. In addition, the classifiers SVM, KNN acquired minimum error with the highest accuracy compared with the other classifiers. While DT has the highest estimation speed, LDA has the shortest training time.

Doi: 10.24012/dumf.1096691

*Corresponding Author

Introduction

Electrical power systems are the foundation of economy. Many systems including banking, railroad networks, telecommunication and computers cannot operate without electricity. Power systems are comprised of generation, transmission and distribution lines. Transmission lines are the main method of obtaining energy in a reliable manner in power systems. Many external factors such as dirty isolator, falling trees, lightning, wind etc. result in faults in power systems. Faults in transmission lines make up 80-90 % of the faults in power systems [1]. Faults are classified into two as temporary and permanent. If the fault is resolved in a short period of time and normal operation resumes, these types of faults are called temporary faults. Temporary faults should be resolved in the shortest amount of time possible. Faults that develop after short circuits are called permanent faults [2]. Short circuit faults make up 70 % of the faults in electrical system faults and are among the faults that affect consumers the most [3]. These faults such as the increase of power losses, shortening of the duration of using the devices, heating up of the cables etc. may result in significant damages in many

electrical transmission systems and devices. Hence, the fault causing the short circuit should be identified as soon as possible along with the faulty phase [4]. It is very important to identify the type, class and position of the fault for protecting the transmission lines [5]. The classification of short-circuit faults in the transmission line is very important for the correct detection of the fault. Thus, the damages that develop in electrical systems are reduced, the quality of power systems is enhanced, system stability is increased. The most fundamental method for reducing faults in energy transmission lines is the accurate classification of short circuit faults [6]. Extended maintenance works lead to economical damages as well as wasting of energy. For this purpose, the maintenance responsible will not have to examine the transmission line in full if the fault can be classified rapidly. The following techniques are used for the classification of faults in transmission lines.

- Impedance measurement
- Traveling wave phenomena

- Artificial intelligence [7]

There are many factors that affect the classification of the fault such as fault type, the starting time of the fault, fault current, stable state of the voltage [8].

Ray and Mishra used SVM for predicting the fault type in long transmission lines. The simulation results illustrated that the suggested method classified the fault type with an accuracy of 99.21 % [9]. Chen et al. suggested the Summation-Wavelet Extreme Learning Machine (SW-ELM) method for classifying the faults in transmission lines and for detecting the position of the fault. The results in the dataset put forth that SW-ELM method classified the faults with an accuracy of 98.22 % [10]. Ekici suggested SVM and wavelet transformation for classifying fault types and predicting the location of the fault. A classification error of lower than 1 % was obtained for a 360km long transmission line [11]. Freire et al. utilized the Hidden Markov Model (HMM), ANNSVM and KNN for classifying the faults in transmission lines. The results proved that the HMM algorithm displayed a better performance compared with classifiers such as ANN, SVM and KNN [12]. Jamehbozorg and Shahrtash suggested the DT algorithm for fault classification. The simulation results put forth that the algorithm was able to classify the faults in a very short amount of time and with high accuracy [13]. Samantaray used a systematic DT based approach for classifying the transmission line faults. The suggested method yielded an accuracy that was better compared with the intuitionistic fuzzy logic [14]. Mahanty and Gupta used the methods of wavelet analysis and artificial neural network for classifying the transmission line faults. The simulation results showed that the wavelet method provided better results compared with the artificial neural network [15]. Nguyen and Liao suggested the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) for transmission line fault classification. Satisfactory results were obtained with the designed system [16].

The aim of this study is to determine which type of fault is the algorithm in the case of phase-earth, phase-phase-earth, phase-phase, phase-phase-phase and no faults occurring in the transmission line. It was observed as a result of a literature survey that many classifiers have been used for electrical fault classification. However, a study could not be found which utilizes all of the classifiers of SVM, KNN, DT, Ensemble, LDA which compares their performances. In most studies, the performance of algorithms used to classify failures has been evaluated in terms of accuracy, sensitivity, error rate and predictive value. However, in this study, estimation speed and training time were added together with these parametric measurements. SVM, KNN, DT, Ensemble, LDA algorithms have proven shortcomings and their superiority over each other.

The present study was organized as follows. Section 2 explains the SVM, KNN, DT, Ensemble, LDA classifiers and their performance criteria. Section 3 explains the data analysis and simulation results. Whereas Section 4 summarizes the study results.

Methodology

Support Vector Machine

SVM is an algorithm developed by Vladimir Vapnik which is used for non-linear classification and regression. SVM is the linear separation hyperplane of the data at point (x_i, y_i) . $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}$ is the feature vector; $i=1, \dots, n$, p denotes the number of features, n is the number of trainings, y_i is the class label. The best hyperplane is the distance to the best training data points. Observations from the side margin and hyperplane are known as support vectors. The position of the hyperplane depends on these observations. The position of the hyperplane changes when the position of even one of these observations changes. Linear separation of the hyperplane results in optimal classification. However, since the data in different classes are not clear most of the time, linear classification will most likely lead to erroneous results [17]. SVMs have been used in many areas ranging from image perception, classification, fault analysis, regression and text perception. This algorithm aims to setup a nonlinear hyperplane using nonlinear input data. SVM displayed a better performance compared with the traditional statistical models in many applications such as pattern recognition, classification and analysis. Different kernel functions such as radial basis function, function polynomial, and linear are used in SVM models. The features of the SVM method are as follows:

- SVM is responsive and reliable
- Can model non-linear data.
- Requires less assembly than other models
- Used in regression, pattern recognition and classification problems [18].

K-Nearest Neighbours Algorithm

KNN is the most frequently used algorithm for the classification of data objects. The distance between test and training data identify the nearest neighbour in KNN algorithm. In KNN, k denotes the classifier indicating the number of neighbours of which the classification is affected. As an example, if $k=1$ it is assigned to the class of the nearest neighbour. Distance functions such as Minkowsky, Euclid, Manhattan, Chebyshev and City-block are used in KNN algorithm. The steps of the KNN algorithm are indicated below:

- Calculate the nearest k neighbour number.
- Calculate the distance between the training data and the test data.
- Order the distances subject to the k th minimum distance.
- Classify the nearest neighbours.

- Predict the new data object with the help of the nearest neighbours [19].

$T = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\}$ is the training set and N is the number of training data. $x_i \in R^d$ feature vector, $y_i \in Y = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ classification label, $i = 1, 2, \dots, N$. $N_{k(x)}$ x is the k nearest neighbor with x input data. The voting process is as follows:

$$y = \operatorname{argmax} \sum_{x_i \in N_{k(x)}} I(y_i = c_j) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

I denotes the indicator function [20].

$$I = \begin{cases} 1, & y_i = c_i \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

Decision Tree

DT is a classifier comprised of learning and classification. DT learns during the learning stage how a DT can be formed from a series of training sets. Whereas in the classification stage, the data are classified via DT. A DT consists of nodes, branches and leaves. Figure 1 shows a four-dimensional attribute space and a DT example for two classes.

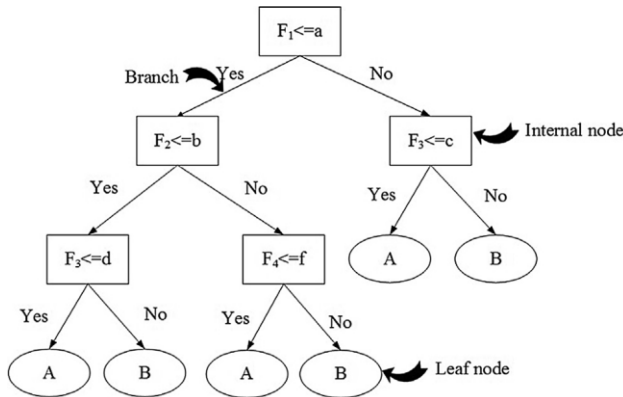


Figure 1. Decision tree classifier flowchart

Each node represents the attribute test, each branch represents the output of the attribute test and each leaf represents classification [21]. Decision trees are classified into two groups as classifier and regression trees. Classifier trees are used for predicting a discrete variable whereas regression trees are used to predict continuous variables. The most important advantage of DT is that the general process time is short when there is no need for variable transformations. In addition, it can easily model the complex relations between the variables and decision makers can make rapid interpretations. Trees should be formed and the branches should be pruned in order to model DT. In order to generate an ideal DT, first a DT is developed with the largest size after which the pruning process is conducted subject to the ideal pruning threshold. The tree will grow based on certain criteria in DT prior to pruning. A full tree will be formed and sub-trees will be pruned based on certain criteria [22]. If the attribute cuts the space with a hyperplane parallel to the axis it is known as a single

variable tree, whereas if it divides in a skewed manner it is known as a multivariate tree. DT is frequently preferred due to its ease of use, efficiency and success in classification [23].

Ensemble

Ensemble classifier is based on the principle of generating and conjoining of multiple classifiers to reach the optimum solution of a problem [24]. The main idea behind the ensemble methodology is assigning different weights to different classes and conjoining all classifiers. A weight value is assigned for each opinion and all opinions are joined prior to coming to a decision. Knowledge consistency and classification dependency are very important while developing a classifier. Different classifiers have different interpretations regarding a sample and all classifiers are independent of each other [25]. The ensemble acquires the ability for prediction after completing the training [26]. Ensemble classifier is used in many applications due to its performance in classifying complex data [27].

Linear Discriminant Analysis

LDA analyses different object groups subject to more than one variable and determines the differences between them. It contains a dataset, predictors and different measurements with class labels. Prediction values are classified based on the information in the old data set. Training data are known as the observations in the class labels. LDA network is trained via training data. Some classifications in the training set are wrong. Re-substitution error is calculated for identifying the ratio of these misclassifications. Misclassification sets are calculated using the confusion matrix in the training set. The confusion matrix is comprised of predicted class labels and known class labels [28]. Discriminant is used for classifying low dimension samples with the same attributes from the LDA large dimension attribute space. Samples of different types are tried to be used as much as possible in order to ensure that the classification is accurate.

$$\sum_{i=1}^c P(i) E\{(u_i - x)(u_i - x)^T | x \in \text{class } i\} \quad (3)$$

$$s_b = \sum_{i=1}^c P(i)(u_i - u)(u_i - u)^T \quad (4)$$

$$N = n_1 + n_2 + \dots + n_c \quad x_1, x_2, x_3, \dots, x_m \quad P(i)R^n \quad (5)$$

X represents the dataset, n_i i th class, c sample space class, u_i i th class mean vector, u average of all data, S_w in-class distribution, S_b intra-class distribution [29].

Performance Criteria

SVM, KNN, DT, Ensemble and LDA algorithms have been used for the classification of faults in electrical power systems. f_p, f_n, t_n, t_p respectively denote wrong positive, wrong negative, real negative and real positive. The

following metrics have been used for measuring the performances of these algorithms.

Accuracy (ACC) is a parameter that defines the accurate classification ratio:

$$ACC\% = \frac{t_n+t_p}{t_n+f_p+f_n+t_n} \tag{6}$$

Sensitivity (Sen) is the parameter defining sensitive classification [30].

$$Sen\% = \frac{t_p}{t_p+f_n} \times 100 \tag{7}$$

Error ratio (ERR) is the ratio of the wrong positive and wrong negatives to the total number of calculations [31].

$$ERR = \frac{f_n+f_p}{t_p+f_p+f_n+t_n} \tag{8}$$

Simulation Results and Data Analysis

Data Analysis

In this study phase-earth, phase-phase-to-ground, phase-phase, phase-phase-phase and no-fault conditions were investigated. Table 1 presents the fault types in power systems. G in Table 1 represents ground whereas A, B, C represent the three phases. Table 2 shows the input and output values for the simulation. A total of 2100 data have been used in the study. However, Table 2 shows only a portion of the data. The input values of the simulation $I_a, I_b, I_c, V_a, V_b, V_c$ and the output values have been considered as the fault classes. The parameters of the SVM algorithm are given in Table 3, the parameters of the KNN algorithm are given in Table 4, the parameters of the Decision tree algorithm are given in Table 5, the parameters of the LDA algorithm are given in Table 6, and the parameters of the Ensemble algorithm are given in Table 7. These algorithms used of the data 70% as training data and 30% as test data. Single-phase fault Class 1 fault, phase-phase-earth fault Class 2 fault, phase-phase fault Class 3 fault, phase-phase-phase fault Class 4 fault, no fault Class 5 fault has been accepted. These data are taken from the kaggle date set. Data set was given to SVM, KNN, Decision tree, LDA, Ensemble algorithms and confusion matrix was obtained. Based on this matrix, accuracy, precision and error rate were calculated for each class.

Table 1. Power system error class [32]

Fault type	G	C	B	A
A-Gnd (Type 1)	1	0	0	1
A-B-Gnd (Type 2)	1	0	1	1
A-B	0	0	1	1

(Type 3) A-B-C	0	1	1	1
(Type 4) No fault	0	0	0	0
(Type 5)				

Table 2. Input and output values of the power system[32]

I_a	I_b	I_c	V_a	V_b	V_c	Class
-151	9	85	0.40075	-0.13293	-0.26781	1
-336	-76	18	0.312732	-0.12363	-0.1891	1
-502	-174	-80	0.265728	-0.1143	-0.15143	1
-593	-217	-124	0.235511	-0.10494	-0.13057	1
-643	-224	-132	0.209537	-0.09555	-0.11398	1
-83	42	38	0.41693	-0.06644	-0.35049	2
-304	243	42	0.097053	0.089765	-0.18682	2
-487	377	29	-0.13245	0.203226	-0.07078	2
-603	439	9	-0.24861	0.263483	-0.01487	2
-620	423	0.61	-0.22692	0.254651	-0.02773	2
41	-93	55	0.51751	-0.00369	-0.51383	3
42	-105	65	0.518491	-0.00807	-0.51042	3
43	-105	65	0.511217	0.003798	-0.51501	3
43	-100	59	0.499096	0.025105	-0.5242	3
44	-95	53	0.487527	0.045052	-0.53258	3
-99	44	57	0.412305	-0.09152	-0.32078	4
-342	218	125	0.095905	-0.00347	-0.09243	4
-526	347	181	-0.13109	0.05679	0.074304	4
-633	416	218	-0.24598	0.084683	0.161301	4
-639	412	229	-0.22452	0.07558	0.148943	4
61	-22	21	0.36632	-0.56718	0.200859	5
48	-23	21	0.367341	-0.56426	0.196916	5
34	-23	21	0.368258	-0.56117	0.19291	5
20	-24	21	0.369086	-0.55792	0.18883	5
7	-25	21	0.370321	-0.5545	0.184184	5

Table 3. SVM parameters

Prese t	Kernel functio n	Kernel scale	Box constrain t level	Multiclas s method	Standardiz e data
Cubi c SVM	Cubic	Automati c	1	One-vs-One	True

Table 4. KNN parameters

Preset	Number of neighbors	Distance metric	Distance weight	Standardize date
Fine KNN	1	Euclidean	Equal	True

Table 5. Decision tree parameters

Preset	Maximum number of splits	Split criterion	Surrogate decision splits
Complex Tree	100	Gini diversity index	off

Table 6. LDA parameters

Preset	Regularization
Quadratic Discriminant	Diagonal covariance

Table 7. Ensemble parameters

Preset	Ensemble method	Learner type	Maximum number of splits	Number of learners	Learnin rate
Boosted Tree	Adaboost	Decision tree	20	30	0.1

Simulation Results

In this study, 5 fault types in power transmission lines were examined. SVM, KNN, Tree, LDA, Ensemble classifiers have been used for classifying these faults. Figure2 shows confusion matrix of SVM classifier, Figure3 shows confusion matrix of KNN classifier, Figure4 shows confusion matrix of Decision decision tree classifier, Figure5 shows confusion matrix of LDA classifier and Figure6 shows confusion matrix of Ensemble classifier. These results have helped us in determining the accuracy, sensitivity and error ratio of the algorithms. Table 8 presents the accuracy values for the SVM, KNN, decision tree, LDA, Ensemble classifiers. An accuracy of 99.8 % has been attained for the first 3 fault types with SVM and KNN. However, while SVM yielded the highest accuracy for the 4th fault type with 99.8 %, KNN provided the highest accuracy for the 5th fault type with 100 %. The Ensemble algorithm is in the 1st failure, and the LDA algorithm is in the 2nd, 3rd, 4th, 5th failure obtained the worst accuracy value. Table 9 shows the sensitivities for the classifiers SVM, KNN, decision tree, LDA, Ensemble. The sensitivity of classifiers displayed different performances for each fault type. The best sensitivity of the classifiers was 100 % whereas the worst sensitivity was 88 %. Table 10 shows the error ratio for the SVM, KNN, decision tree, LDA, Ensemble classifiers. The minimum error ratio of the SVM and KNN algorithms for the first 3 fault classes was 0.011. While the error ratio for the SVM algorithm was 0.0017 for the 4th fault type, KNN algorithm error rate was 0 for the 5th fault type. Table 11 presents the accuracy, prediction speed and training time for the SVM, KNN, decision tree, LDA, Ensemble classifiers. The results were 99.7 % for SVM, KNN with the best accuracy, best prediction speed for decision tree with 29000obs/sec and the shortest training time for LDA with 0.76992 sec. When we compare the Ensemble algorithm with other algorithms, it has the lowest prediction speed of 4000obs/sec and the highest training time of 10,621sec.

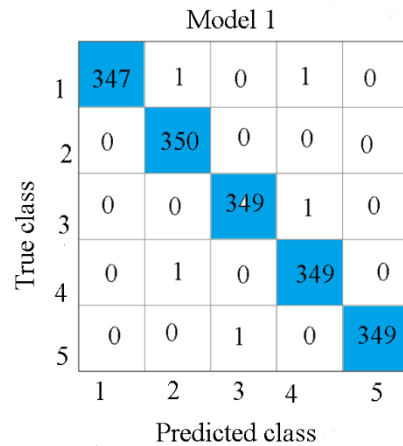


Figure 2. SVM classifier

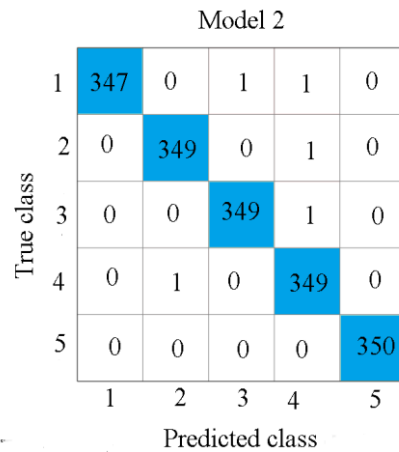


Figure 3. KNN classifier

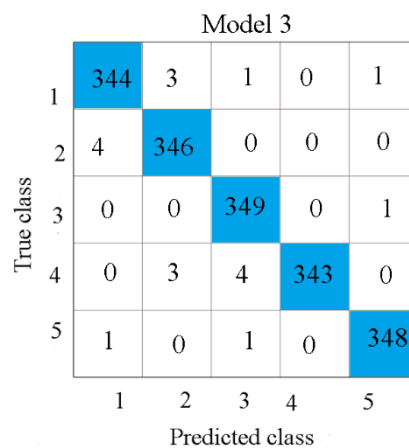


Figure 4. Decision tree classifier

Model 4

True class	1	323	3	0	0	23
	2	33	301	0	15	1
	3	0	0	306	32	12
	4	2	0	0	347	1
	5	1	0	0	0	349
		1	2	3	4	5
		Predicted class				

Figure 5. LDA classifier

Model 5

True class	1	340	0	0	0	9
	2	15	335	0	0	0
	3	1	0	341	0	8
	4	0	8	4	337	1
	5	1	0	0	0	349
		1	2	3	4	5
		Predicted class				

Figure 6. Ensemble classifiers

Table 8. Accuracy of the algorithms

Algorithm	Class1	Class2	Class3	Class4	Class 5
SVM	0.998	0.998	0.998	0.998	0.999
KNN	0.998	0.998	0.998	0.997	1
Decision Tree	0.994	0.994	0.995	0.995	0.997
LDA	0.964	0.970	0.974	0.971	0.978
Ensemble	0.985	0.986	0.992	0.992	0.989

Table 9. Sensitivity of the algorithms

Algorithm	Class1	Class2	Class3	Class4	Class 5
SVM	0.994	1	0.997	0.997	0.997

KNN	0.994	0.997	0.997	0.997	1
Decision Tree	0.985	0.988	0.997	0.98	0.994
LDA	0.899	0.99	1	0.88	0.997
Ensemble	0.952	0.957	0.988	1	0.997

Table 10. Error rate of the algorithms

Algorithm	Class1	Class2	Class3	Class4	Class 5
SVM	0.0011	0.0011	0.0011	0.0017	0.0005
KNN	0.0011	0.0011	0.0011	0.0022	0
Decision Tree	0.0057	0.005	0.004	0.004	0.002
LDA	0.035	0.029	0.025	0.028	0.021
Ensemble	0.0148	0.013	0.0074	0.007	0.997

Table 11. Performance of the algorithms

Algorithm	Accuracy	Prediction speed	Training Time
SVM	99.7	7000obs/sec	8.4807sec
KNN	99.7	18000obs/sec	1.1106sec
Decision Tree	98.9	29000obs/sec	1.341sec
LDA	93	14000obs/sec	0.76992sec
Ensemble	97.3	4000obs/sec	10.621sec

Conclusion

Phase-ground, phase-phase ground, phase-phase, phase-phase-phase from among the most frequently observed faults in electrical networks along with the no-fault states have been examined. While the algorithms are classifying the failures, the the superiorities and weakness of SVM, KNN, decision tree, LDA, Ensemble algorithms are determined. In addition, the success of these algorithms for classifying the faults was also examined. These algorithms were examined with regard to performance, accuracy, sensitivity, error rate, prediction speed and training times. SVM and KNN algorithms showed similar performances. These algorithms showed 99.7% accuracy while classifying

the failures. Also, the error rates of SVM and KNN algorithms are very close to each other. The KNN algorithm has a faster estimation speed and shorter training time than the SVM algorithm. Decision tree algorithm has faster prediction time than other algorithms. LDA algorithm has the shortest training time. The Ensemble algorithm has the slowest prediction speed and the longest training time.

In further studies, different failure classes and performances of different algorithms will be examined.

References

- [1] M. N. Mahmud, M. N. Ibrahim, M. K. Osman & Z. Hussain, "A robust transmission line fault classification scheme using class-dependent feature and 2-Tier multilayer perceptron network", *Electrical Engineering*, vol.100(2), pp.607-623,2018, doi:10.1007/s00202-017-0531-5.
- [2] S. S. Gururajapathy, H. Mokhlis & H. A. Illias, "Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review", *Renewable and sustainable energy reviews*, vol.74, pp.949-958,2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.021.
- [3] J. C. A. Freire, A. R. G. Castro, M. S. Homci, B. S. Meiguins & J. M. De Morais, "Transmission line fault classification using hidden Markov models". *IEEE Access*, vol.7, pp.113499-113510,2019, doi:10.1109/ACCESS.2019.2934938.
- [4] H. Fathabadi, "Novel filter-based ANN approach for short-circuit faults detection, classification and location in power transmission lines", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol.74,pp.374-383,2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.08.005.
- [5] A. Rahmati, & R. Adhami, "A fault detection and classification technique based on sequential components". *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.50(6), pp.4202-4209,2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2313652.
- [6] N. Huang, J. Qi, F. Li, D. Yang, G. Cai, G. Huang, ... & Z. Li, "Short-circuit fault detection and classification using empirical wavelet transform and local energy for electric transmission line", *Sensors*, vol.17(9), pp. 2133,2017, doi:10.3390/s17092133.
- [7] P. Ray, & D. P. Mishra, "Support vector machine-based fault classification and location of a long transmission line", *Engineering science and technology, an international journal*, vol.19(3), pp.1368-1380,2016, doi: 10.1016/j.jestch.2016.04.001
- [8] Z. He, S. Lin, Y. Deng, X. Li, & Q. Qian, "A rough membership neural network approach for fault classification in transmission lines", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol.61, pp.429-439,2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.03.027.
- [9] P. Ray, & D. P. Mishra, "Support vector machine based fault classification and location of a long transmission line", *Engineering science and technology, an international journal*, vol.19(3), pp.1368-1380,2016, doi: 10.1016/j.jestch.2016.04.001.
- [10] Y. Q. Chen, O. Fink & G. Sansavini, "Combined fault location and classification for power transmission lines fault diagnosis with integrated feature extraction", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65(1), pp. 561-569,2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2721922.
- [11] S. Ekici, "Support Vector Machines for classification and locating faults on transmission lines", *Applied soft computing*, vol.12(6), pp. 1650-1658,2012, doi: 10.1016/j.asoc.2012.02.011.
- [12] J. C. A. Freire, A. R. G. Castro, M. S. Homci, B. S. Meiguins & J. M. De Morais, "Transmission line fault classification using hidden Markov models", *IEEE Access*, vol.7, pp.113499-113510,2019, doi:10.1109/ACCESS.2019.2934938.
- [13] A. Jamehbozorg & S. M. Shahrtash, "A decision-tree-based method for fault classification in single-circuit transmission lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.25(4), pp.2190-2196,2010, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2053222.
- [14] S. R. Samantaray, "A systematic fuzzy rule based approach for fault classification in transmission lines", *Applied soft computing*, vol.13(2), pp.928-938,2013, doi: 10.1016/j.asoc.2012.09.010.
- [15] R. N., Mahanty, & P. B. Dutta Gupta . "Comparison of fault classification methods based on wavelet analysis and ANN", *Electric Power Components and Systems*, vol.34(1), pp.47-60,2006. doi:10.1080/15325000691001485
- [16] T. Nguyen & Y. Liao, "Transmission line fault type classification based on novel features and neuro-fuzzy system", *Electric Power Components and Systems*, vol.38(6), pp.695-709,2010, doi:10.1080/15325000903489702.
- [17] I. Aljarah, A. Z. Ala'M, H. Faris, M. A Hassonah, S. Mirjalili, S., & H. Saadeh, "Simultaneous feature selection and support vector machine optimization using the grasshopper optimization algorithm. *Cognitive Computation*, 10(3), 478-495,2018, doi:10.1007/s12559-017-9542-9.
- [18] A. Zendejboudi, M. A. Baseer & R. Saidur, "Application of support vector machine models for forecasting solar and wind energy resources: A review", *Journal of cleaner production*, vol.199, pp.272-285,2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.164.
- [19] N. Ali, D. Neagu & P. Trundle, "Evaluation of k-nearest neighbour classifier performance for heterogeneous data sets", *SN Applied Sciences*, vol.1(12), pp.1-15,2019, doi:10.1007/s42452-019-1356-9.
- [20] Y Guo, H. Cao, S. Han, Y. Sun, & Y. Bai, "Spectral-spatial hyperspectral image classification with k-nearest neighbor and guided filter", *IEEE Access*, vol.6, pp.18582-18591,2018, doi:10.1109/ACCESS.2018.2820043.

- [21] T. Lan, H. Hu, C. Jiang, G. Yang & Z. Zhao, "A comparative study of decision tree, random forest, and convolutional neural network for spread-F identification", *Advances in Space Research*, vol.65(8), pp.2052-2061,2020, doi: 10.1016/j.asr.2020.01.036.
- [22] J. Dou, A. P. Yunus, D.T. Bui, A. Merghadi, M. Sahana, Z. Zhu, ... & B.T. Pham, "Assessment of advanced random forest and decision tree algorithms for modeling rainfall-induced landslide susceptibility in the Izu-Oshima Volcanic Island, Japan", *Science Of The Total Environment*, vol.662, pp.332-346,2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.221
- [23] M. Czajkowski & M. Kretowski, "Decision tree underfitting in mining of gene expression data. An evolutionary multi-test tree approach", *Expert Systems with Applications*, vol.137, pp.392-404,2019, doi: 10.1016/j.eswa.2019.07.019.
- [24] M.M. Fraz, W. Jahangir, S. Zahid, M.M. Hamayun & S.A. Barman, "Multiscale segmentation of exudates in retinal images using contextual cues and ensemble classification", *Biomedical Signal Processing and Control*, vol.35, pp.50-62,2017, doi: 10.1016/j.bspc.2017.02.012.
- [25] G. Singh, B. Singh, & M. Kaur, "Grasshopper optimization algorithm-based approach for the optimization of ensemble classifier and feature selection to classify epileptic EEG signals", *Medical & biological engineering & computing*, vol.57(6), pp.1323-1339,2019, doi:10.1007/s11517-019-01951-w
- [26] B. Chithra, & R. Nedunchezian, "Dynamic neutrosophic cognitive map with improved cuckoo search algorithm (DNCM-ICSA) and ensemble classifier for rheumatoid arthritis (RA) disease", *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*,2020, doi: 10.1016/j.jksuci.2020.06.011
- [27] I. Cárdenas-Gallo, C.A. Sarmiento, G. A. Morales, M. A. Bolivar & R. Akhavan-Tabatabaei, "An ensemble classifier to predict track geometry degradation", *Reliability Engineering & System Safety*, vol.161, pp.53-60,2017. Doi:10.1016/j.ress.2016.12.012
- [28] A. Yadav & A. Swetapadma, "A novel transmission line relaying scheme for fault detection and classification using wavelet transform and linear discriminant analysis", *Ain Shams Engineering Journal*, vol.6(1), pp.199-209,2015, doi: 10.1016/j.ress.2016.12.012
- [29] H. Wang, Y. Fan, B. Fang & S. Dai, "Generalized linear discriminant analysis based on euclidean norm for gait recognition", *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, vol.9(4), pp.569-576,2018, doi: 10.1016/j.ress.2016.12.012
- [30] M.M. Ghiasi, S. Zendejboudi, & A.A. Mohsenipour, "Decision tree-based diagnosis of coronary artery disease: CART model", *Computer methods and programs in biomedicine*, vol.192, pp.105400,2020, .doi: 10.1016/j.cmpb.2020.105400
- [31] G. Zeng, "On the confusion matrix in credit scoring and its analytical properties", *Communications in Statistics-Theory and Methods*, vol. 49(9), pp. 2080-2093,2020, doi:10.1080/03610926.2019.1568485
- [32] Electrical Fault detection and classification, A collection of line currents and voltages for different fault conditions, https://www.kaggle.com/esathyaprakash/electrical-fault-detection-and-classification?select=detect_dataset.csv



Derleme Makalesi/Review Article

Eğitimde ve Tıpta Sanal Gerçeklik Uygulamaları: Geçmişten Geleceğe Uzanan Bir İnceleme

Applications of Virtual Reality in Education and Medicine: A Review of the Past, Present, and Future Outlook

Ufuk ÇELİKCAN

Hacettepe University, Department of Computer Engineering, ufuk.celikcan@gmail.com, Orcid No: 0000-0001-6421-185X

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 16 Ocak 2022
Revizyon 3 Nisan 2022
Kabul 3 Nisan 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

sanal gerçeklik, eğitim teknolojileri, tıp eğitimi, cerrahi simülasyonlar, uzaktan eğitim, teletıp

ÖZ

Sanal gerçeklik, daha önce ayak basmadığımız yerleri sanal olarak ziyaret edip sanki oradaymış gibi tecrübe etmemize imkan verirken zaman ve mekan algılarını manipüle etme becerisi, sağladığı etkileşim seçenekleri, aynı anda birçok katılımcıyı barındırabilmesi ve katılımcılara deneyimin anlatı akışını yönlendirme olanağı vermesi gibi başlıca özellikleriyle öncüllerine kıyasla benzersiz özellikleri olan yeni bir medyadır. Sanal gerçekliğe ilginin yüksek olduğu ve artmaya devam edeceği açıktır. Teknolojinin yenilikçi kullanımları, günümüz popülasyonlarında, özellikle teknolojik gelişmeleri yakından takip eden ve bunları hızlı bir şekilde benimseyebilen Z kuşağı için önemli faydalar sağlayabilmektedir. Eğitim ve tıp, son yıllarda sanal gerçekliğin önemli dönüşümlere yol açtığı alanların başında gelmektedir. Sanal gerçekliğin bu alanlardaki uygulamaları giderek çeşitlenmekte, olgunlaşmakta ve bunlara dair araştırmalarda olumlu sonuçların alındığı görülmektedir. Bu çalışmada, sanal gerçekliğin eğitim ve tıp alanlarındaki uygulamaları, yapılan bilimsel araştırmalar çerçevesinde incelenmiştir. Bu incelemenin ışığında uygulamada edinilen tecrübeler, karşılaşılan zorluklar ve bu zorlukları aşmaya dair öneriler verilmiş ve sanal gerçekliğin gelecekteki yerine dair öngörüler COVID-19 pandemisi ile şekillenen yeni normalin etkileri ile birlikte ele alınmıştır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 January 2022
Received in revised form 3 April 2022
Accepted 3 April 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

virtual reality, education technologies, medical education, surgical simulators, distance education, telemedicine

ABSTRACT

Allowing us to visit places we have never set foot before and to experience them as if we were there, virtual reality is a new medium with unique characteristics compared to its predecessors with its main features such as its ability to manipulate perceptions of time and space, the interaction options it provides, enabling to host many participants at the same time, and empowering the user to direct the narrative flow of the experience. It is clear that interest in virtual reality is high and will continue to increase. Innovative uses of technology can provide significant benefits in today's populations, especially for the Generation Z, who closely follow technological developments and can adopt them quickly. Education and medicine are among the major fields where virtual reality has led to significant transformations in recent years. In this review, the applications of virtual reality in the fields of education and medicine are examined within the scope of scientific research. In the light of this review, the experiences gained in practice, the challenges encountered, and recommendations to overcome these challenges were given and predictions regarding the future place of virtual reality were discussed together with the effects of the new normal that has been shaped with the COVID-19 pandemic.

Doi: 10.24012/dumf.1097748

Sanal gerçekliğin temelleri

Sanal gerçeklik, Jerald tarafından [4], bilgisayar vb. aygıtlarla oluşturulan ve sanki gerçekmiş gibi deneyimlenip etkileşime girilebilen bir dijital ortam olarak tanımlanmaktadır. Bu tanıma uygun tecrübeleri sağlayabilen sanal gerçeklik teknolojilerinin temelleri 1960'lara kadar uzanmaktaysa da daha çok son yıllarda donanım teknolojilerinde kat edilen önemli gelişmelere paralel olarak tüketicilerin kolay erişimine ve kullanımına uygun sanal gerçeklik cihazlarının ortaya çıkışıyla birlikte sanal gerçeklik oldukça popüler ve yaygın hale gelmiştir. Bunun sonucunda, sanal gerçeklik günümüzde eğlenceden eğitime, sağlıktan savunmaya uzanan geniş bir yelpazede çok çeşitli uygulamalarla günlük kullanıma girmiştir.

Milgram ve Kishino'ya göre gerçek ortam ve sanal ortam arasında bir süreklilik vardır [129]. Bu sürekliliğin bir ucunda herhangi bir donanım kullanmadan çıplak gözle algılanabilen ve yalnızca gerçek varlıklardan oluşan tamamen gerçek bir ortam bulunurken, diğer ucu ise yalnızca sanal varlıklardan oluşan tamamen bilgisayar üretimi sentetik bir ortama varmaktadır. Bu aralıkta gerçek ve sanal nesnelere karışımından oluşan herhangi bir ortam *karma gerçeklik* olarak tanımlanır. Gerçek dünyanın sanal içerikle zenginleştirildiği karma gerçeklik ortamlarına *artırılmış gerçeklik*, içeriğin çoğunun sanal olduğu ancak gerçek dünya nesnelere bir miktar farkındalığının veya dahililiyetinin bulunduğu ortamlara ise *artırılmış sanallık* adı verilir.

Sanal gerçeklik, hiç gitmediğimiz yerleri sanal olarak ziyaret edip sanki oradaymış gibi tecrübe etme imkanı vererek ve benliğimizin kapılarını sanal dünyalara açabilme yetisi sunarak köklü değişiklikleri hayatımıza getirebilme vaadi olan oldukça güçlü bir teknolojidir. Bu sanal dünyalar, üzerinde yaşadığımız dünyanın veya evrenin bambaşka köşelerinin sanal iz düşümleri olabileceği gibi tamamen hayal mahsulü evrenlerin parçaları da olabilirler. Sanal gerçeklikte duyularımızı yapay olarak inandırıcı biçimde uyarılması sayesinde kendimizi bu dünyalarda var hissedebiliriz. Geliştirilen güncel teknolojilerden ve yöntemlerden yararlanılarak, sanal gerçeklikte bir veya daha fazla duyumuz, kısmen de olsa, alıkoşulur ve sıradan uyaranlar yapay uyarılar ile değiştirilir ya da güçlendirilir. Böylelikle, bilgisayar üretimi olan dijital dünyaları tecrübe edebilir ve onlarla etkileşime geçebiliriz. Dahası, bu dünyalarda başkalarıyla sosyalleşebiliriz ve etkileşime girdiğimiz bu başkaları gerçek kişilerin sanal yansımaları olabileceği gibi tamamen dijital varlıklar da olabilirler.

İnsanlık tarihinin geçtiği safhalar, fikirleri iletmek ve deneyimlemek için kullanılan medyanın gelişimiyle işaretlene gelmiştir. Sanal gerçeklik aslında mağara resimlerinden fotoğraflara, filmlerden televizyona, dijital oyunlardan internet sitelerine uzanan bu yoldaki yeni durağımızdır ve hala gelişimine devam etmektedir. Bu bakımdan, sanal gerçekliği bir teknoloji olarak tanımlarken aynı zamanda devrim içinde yeni bir medya olarak da ele alabiliyoruz. Bir yeni medya olarak sanal gerçeklik, içerdiği sanal objeler ve etkileşimler ile bir varlık algısı oluşturarak bireyin bilincini etkileyebilmektedir. Bu oluşturulan varlık algısının etkinliği, monitörler, özel gözlükler, kasklar, eldivenler, tulumlar gibi çok çeşitli teknolojilerden ve

bileşenlerden faydalanılarak görsel, işitsel, dokunsal vb. geri bildirimler yoluyla güçlendirilebilir.

Sanal gerçeklik, onu öncüllerine kıyasla benzersiz bir ortam (medya) haline getiren özelliklere sahiptir. Bu özelliklerin başlıcaları, zaman ve mekan algılarını manipüle etme becerisi, sunduğu etkileşim seçenekleri, aynı anda aynı ortamda birden fazla katılımcıyı barındırabilmesi ve bu katılımcılara deneyimin anlatı akışını yönlendirme imkanı verebilmesidir. Sanal gerçeklik, tüm bu bileşenleri tek bir ortamda bir araya getirerek katılımcı ve ortam arasında dinamik bir ilişki için fırsat yaratır [1].

Sanal gerçekliği bütünüyle tanımlayabilmek için iki ana kavramdan bahsetmemiz gerekir. Bunlardan ilki tecrübe edilen ortamın *çevreleme* (ing. immersion) düzeyidir. Dilimize daldırma, sürükleyicilik, sarmalama ve içine alma gibi alternatif isimlendirmelerle de geçmiş olan çevreleme, kullanıcının (tecrübe edenin) duyularının söz konusu ortam tarafından ne derece kuşatılabildiğini ifade eder. İkinci ana kavram olan *bulunuşluk* (ing. presence) ise sanal gerçeklik tecrübesi tarafından sağlanan çevrelemenin katılımcı tarafından öznel olarak nasıl tecrübe edildiğinin en başat göstergesi olarak katılımcının kendini o sanal ortamda ne denli “var” hissettiğinin ölçütüdür.

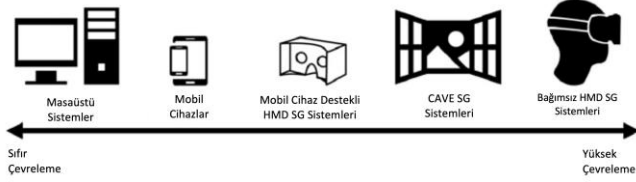
Çevreleme

Çevreleme, zihinsel ve fiziksel olarak iki farklı düzeyde gerçekleşebilir. *Zihinsel çevreleme*, ortamı tecrübe edenin o ortam ile derinden angaje olması, tecrübe edilen anlatıya inanmazlığını askıya alması (ing. suspension of disbelief) ve böylece ortamdaki anlatıya zihinsel olarak katılım sağlamasına yola açar. *Fiziksel çevreleme* ise tecrübe edenin yapay olarak uyarılması suretiyle ne kadar fazla duyusunun ne denli çevrelediğine bağlı biçimde kısmi veya bütün olarak tecrübe edilen ortama bedensel olarak katılım sağlamasına yol açar.

Zihinsel çevreleme, sanal gerçekliğe özgü değildir. Bir film, bir kitap, hatta bir resim bile tecrübe edende zihinsel çevreleme sağlayabilir. Fakat fiziksel çevreleme sanal gerçekliğe has bir yetenektir ve bu bakımdan sanal gerçekliği öncülü olan diğer tüm ortamlardan oldukça farklı kılar. Öte yandan, sanal gerçeklikte çevreleme genel itibarıyla ilk önce fiziksel olarak başlar. Fiziksel çevrelemenin düzeyi, diğer yardımcı unsurlar ile birlikte tecrübe edenin nazarında oluşan zihinsel çevrelemenin düzeyinde belirleyici olur. Sanal ortamı deneyimleyen kişiyi sanal ortam dışındaki tüm etmenlerden uzaklaştırmak suretiyle fiziksel ve zihinsel çevrelemenin bütüncül olarak gerçekleştirildiği durumda sanal gerçeklikte *tam çevreleme* sağlanmış olur. Sanal gerçekliğin doruğu olarak niteleyebileceğimiz ideal bir simülasyonda tam çevreleme gerçekleşir ve simülasyon katılımcısı sanal ortamı gerçeğinden ayırt edemez hale gelir [3].

Çevreleme düzeyi, sanal gerçeklik niteliği açısından oldukça belirleyici olmakla birlikte her sanal gerçeklik tecrübesi çevreleyici değildir. Başka bir deyişle, sanal gerçekliğin çevreleyici olma şartı yoktur. Hatta bazı sanal gerçeklik uygulamaları çevreleyici olmamaları hedeflenerek üretilirler. Bu bakımdan sanal gerçeklik tecrübeleri ne denli çevreleyici olduklarına göre sınıflandırılabilirler. Bu ayrımı belirleyen temel unsur fiziksel çevrelemenin düzeyidir. Fiziksel

çevreleme düzeyi, sanal gerçeklik tecrübesinin meydana getirilmesinde kullanılan yazılım ve daha çok da donanım unsurlarına bağlıdır. Sanal gerçeklik tecrübesinde yer alan donanım unsurları fiziksel çevrelemeyi artırır ve beraberinde yüksek sadakatte hazırlanmış üç boyutlu (3B) sanal objeler, ortamlar ve etkileşimler gibi yazılım unsurlarının da yardımıyla çevrelemeyi pekiştirirler (Şekil 1).



Şekil 1. Sanal gerçeklik (SG) sunan yaygın sistemlerin sağa doğru artan çevreleme düzeyine göre sıralaması [2].

HMD (ks. head mounted display) adı verilen ve kullanıcının görüş alanını tamamen kuşatan 3B sanal gerçeklik kaskları, görüntülerin duvarlara projeksiyonla yansıtılmasına dayanan CAVE (ks. cave automatic virtual environment) adı verilen 3B sanal gerçeklik odaları ve yine projeksiyon ile görüntülerin kubbeye yansıtıldığı 3B sanal gerçeklik kubbeleri, görsel olarak fiziksel çevreleme sunan sistemlerdir. Tam tersine, kullanıcının tüm görsel alanını kuşatmayan iki boyutlu (2B) veya 3B monitörlü masaüstü sanal gerçeklik düzenekleri ve araç bazlı sanal gerçeklik simülatörleri ise görsel açıdan fiziksel çevreleyiciliği olmayan sanal gerçeklik uygulamalarıdır. Bununla birlikte, Second Life, IMVU ve Smeet gibi sanal dünya uygulamaları genelde fiziksel çevreleyiciliği olmayan 2B monitörler (örn, bilgisayarlar, akıllı telefon ve tabletler) ile tecrübe edilmelerine rağmen katılımcıyı yarattıkları sanal dünyalardaki alternatif gerçekliklerde pek çok sayıdaki diğer katılımcılar ile bir araya getirerek değişen düzeylerde zihinsel çevreleme sağlayabilmektedirler. Çevreleme düzeyine etki eden modern sanal gerçeklik görüntüleme sistemleri ve etkileşim yöntemlerinin kapsamlı bir incelemesi Greengard tarafından yapılmıştır [108].

Bulunışluk

Çevreleyici sanal gerçeklik sistemlerinin temel amacı, sanal ortam vasıtasıyla kullanıcıyı psikolojik olarak angaje ederek kullanıcının algısında dış ortamı sanal ortamla değiştirmek, daha doğrusu ikame etmektir. Böylelikle, kullanıcıda belli düzeyde bir çevrelenmenin gerçekleşmesi ve sonuçta kullanıcının kendisini sanal ortamın içinde “var” hissetmesi ile bulunuşluk ortaya çıkar. Bulunuşluk, tanım itibarıyla, bedeninin içsel iletişimiyle gerçekleşen psikolojik ve fizyolojik bir durumdur. Bu son derece öznel yapısı itibarıyla, bulunuşluğun tartışmaya yer bırakmayacak biçimde evrensel olarak niceliklendirilebilmesi epey güçtür.

Çevreleme, kullanılan sanal gerçeklik teknolojisinin karakteristik özellikleri ile ilgiliyken; bulunuşluk ise gerçek dünyaya ve deneyimin teknik ortamına ilişkin geçici bir amnezi veya agnozi yaşayıp, aynı zamanda sanal bir dünyayla çevrelenmeye dair duyulan farkındalıktır. Bulunuşluk hissederken, katılımcı teknolojiye ilgi göstermez ve teknolojiyi algılamaz; bunun yerine teknolojinin temsil ettiği nesnelere, olaylara ve karakterlere dikkat eder ve onları

algılar. Kendini fazlasıyla mevcut hisseden kullanıcılar, sanal gerçeklik teknolojisi tarafından sunulan deneyimi, yalnızca algılanan bir şey değil, ziyaret edilen bir yer olarak görürler [4].

Bulunışluk, kullanıcı ile çevrelemenin bileşkesinde ortaya çıkar. Çevreleme, bulunuşluk hissini üretme yeteneğine sahiptir; ancak çevreleme her zaman bulunuşluğu teşvik etmez. Diğer bir yandan, bulunuşluk, çevrelemenin düzeyi ile sınırlıdır. Bir sistem/uygulama ne denli fazla çevreleme sağlayabilirse, kullanıcının deneyimlediği sanal dünyada kendini var hissedebilmesi için o denli büyük potansiyel sunar. Buna paralel olarak, Slater [5], bulunuşluğun sanal gerçeklik teknolojileri tarafından iki farklı yanılsama ile işlendiğini ortaya koyar:

1. *yer yanılsaması*: böylece kullanıcılar sanal ortamda, çevrelemenin gerçekleştirildiği fiziksel alandan farklı bir yerde olduklarını hissederler.
2. *akla yakınlık yanılsaması*: böylece sanal uyarılar gerçekmiş gibi hissedilir.

Yer yanılsaması, genellikle baş veya göz takip sistemleri ile sağlanır ve bunlar vasıtasıyla etrafa bakma, eğilme gibi fiziksel vücut hareketleri sanal ortama aktararak kullanıcıların yer algıları manipüle edilir. Akla yakınlık yanılsaması ise, sanal gerçeklik deneyimi sırasında etkileşimi ve kullanıcıların eylemleri için oluşturulan anlık yanıtları gerektirir. Bu yolla, kullanıcıların yaptıkları veya deneyimledikleri şeyin gerçekleştiğine dair algılarını pekiştirir. Bu iki yanılsama, birbirine bağlı ve tutarlı çalışan çoklu sensorimotor kanalların entegrasyonuna dayanır. Slater tarafından getirilen bu yaklaşım, bulunuşluk hissini algısal bir yanılsama olarak ele almaya imkan kılar [6].

Araştırmalar, sanal gerçeklik tecrübesinin ortaya çıkardığı bulunuşluk düzeyinin incelenmesinin önemli olduğunu göstermiştir. Örneğin, bulunuşluğun öznel deneyiminin sanal gerçeklik bazlı tedavilerin etkinliğine tesir ettiği [7] ve sanal uyarıların gerçek dünya davranışına dönüşme derecesini etkileyebileceği [8]–[10] ortaya konulmuştur.

Sanal gerçeklikte bulunuşluk farklı biçimlerde ortaya çıkabilir. Alanyazında, bunların üç ana kategoride incelenebileceği görülmektedir [11].

- *İlki kişisel bulunuşluktur*. Bu, katılımcının sanal ortamın bir parçası olduğunu ne düzeyde hissettiğinin bir ölçüsüdür.
- Bir diğeri, katılımcı varlığının deneyimlenen ortam tarafından onanıp tepki verilme düzeyinin yarattığı hisse karşılık gelen *çevresel bulunuşluktur*.
- Üçüncüsü ise, deneyimlenen ortamın başkalarıyla paylaşıldığının hissi olan *sosyal bulunuşluktur*.

Sosyal bulunuşluk, katılımcılar arasında çoklu işbirliğini odağına alanlar başta olmak üzere, pek çok sanal gerçeklik uygulaması için en öne çıkan özelliklerden biridir. Takım çalışmasını ve rakip katılımcılarla etkileşimi içeren savaş simülasyonlarında ve sanal gerçeklik oyunlarında, başka katılımcıların varlığı öngörülemezliği artırarak ortamı daha zorlayıcı hale getiren bir unsur teşkil eder. Sanal prototiplemeye yönelik uygulamalarda, farklı fiziksel mekanlarda bulunan tasarımcılar aynı sanal ortamda buluşup

birbirleriyle etkileşime girerek ortaklaşa çalışabilirler. Uzaktan katılımlı cerrahide, farklı yerlerdeki birden fazla cerrah bir operasyonu birlikte izleyebilir, müdahale edebilir ve gerektiği noktalarda operasyonun kontrolünü birbirlerine devredebilirler.

Bir sanal dünyayı başka katılımcılarla deneyimlerken, onların da o dünyada var olduklarını hissedebilmek, yani nerede bulduklarını, hangi yöne baktıklarını/işaret ettiklerini ve ne söylediklerini bilmek önemlidir. Bu tür çoklu katılıma izin veren sanal ortamlarda, katılımcılar birbirlerinin avaturları vasıtasıyla etkileşirler. Hintçe kökeninde, doğaüstü olduğuna inanılan bir varlığın dünyevi enkarnasyonu anlamına gelen avatar kelimesi sanal gerçeklik jargonunda bir katılımcıyı sanal dünyada temsil eden iki veya üç boyutlu grafiksel formu ifade eder.

Bulunmuşluğa etki eden faktörlerin değerlendirilmesi ve bulunmuşluğun subjektif veya objektif olarak geçerliliğinin niceliklendirilebilmesi amacıyla geliştirilen çeşitli testlerin kapsamlı bir incelemesi Schuemie vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada sunulmuştur [130].

Eğitimde sanal gerçeklik uygulamaları

Pek çok öğrenci, sadece geleneksel öğretim yöntemlerine yer verilen klasik eğitim sonucunda maruz kaldıkları teknik karmaşıklıklar, öğrendikleri kavramların tamamen somut olmaması ve soyut düşünmede karşılaştıkları zorluklar sebebiyle, özellikle STEM (fen, teknoloji, mühendislik ve matematik) derslerinde işlenenler başta olmak üzere, öğretilen konuları anlamada sorunlar yaşayabilmektedir [12][13]. Temel bilgilerdeki eksiklikleri, daha karmaşık sorunların üzerine gidebilmelerini de engeller. Öte yandan, laboratuvarlarda özel araştırma ekipmanlarına dayalı pratik alıştırmalarda, ekipman hasarına yol açabileceği endişesiyle öğrenciler laboratuvar ekipmanını kendi kendilerine değil öğretmen gözetiminde kurarlar. Böylelikle, öğrenciler yanlış yapılandırma etkileriyle karşılaşamazlar ve acil durum senaryolarını deneyimleyemezler. Dahası, çoğu zaman öğrenciler laboratuvar programı dışında pratik yapma ve yetiştirme imkanı da bulamazlar. Bu sorunları adreslemek üzere, çevrimiçi kurslar, harmanlanmış öğrenme yaklaşımları ve bilgisayar tabanlı platformlar vb. modern teknolojileri içeren çözümler geliştirilmiştir. Öğrenciler, bunlar vasıtasıyla aynı konuyu istedikleri aralıkla birden fazla kez tekrar edebilme, endişeye yer olmaksızın hatalar yapma ve hatalarından ders çıkarma imkanlarına kavuşurlar. Eğitim süreçlerinde başarılı olduğu gözlemlenmiş olan çok sayıda donanım ve yazılım örneği, modern eğitim teknolojilerinin öğrencilerin çoğunda öğrenme çıktılarını iyileştirebildiğini göstermektedir [14]. Eğitimde bilgi ve iletişim teknolojilerinin kullanımının öğrenmeye yönelik tutumları iyileştirebildiği pek çok araştırmayla ortaya konulmuştur [15]–[18].

Günümüzde, geleneksel kitapların yerini dijital öğretim içerikleri almakta; klasik defterler yerini el yazısını tanıyabilen özel uygulamaları içeren dokunmatik ekranlı dizüstü bilgisayarlara ve tabletlere bırakılmaktadır. 2019 koronavirüs hastalığı (COVID-19) salgınının zorunlu kıldığı koşulların da etkisiyle, eğitimde güçlü yeni teknoloji araçlarına yönelik giderek hız kazanmaktadır. Uzaktan eğitim ve kişiselleştirilmiş öğrenme bazlı yaklaşımlar, verilen

eğitimi her bir öğrencinin akademik açıdan güçlü ve zayıf yönlerine, tercihlerine ve hedeflerine göre kişisel bazda uyarlamak için giderek daha verimli kullanılabilir hale gelmektedir [19]. Bu gelişmelerle birlikte, son yıllarda sanal gerçekliğin eğitim akışları içinde kullanımı da giderek daha fazla yaygınlaşmaktadır. Sanal gerçeklik, salt eğlence odaklı uygulamalarla ilgili olmaktan çıkıp günümüzde askeriye, psikoloji, tıp gibi alanlarda mesleki eğitimin bir parçası haline gelmiş; bu süreçte, sanal gerçekliğin öğrenme ve öğretme akışlarını desteklemeye ve kolaylaştırmaya yönelik güçlü bir araç olduğu görülmüştür.

Fiziksel laboratuvar temelli öğrenme, daha önce bahsedilen problemlerden ötürü, mezunların temel bilgi ve uygulamalarında eksikliklere neden olabilir ve bu da meslek hayatları boyunca işlerinde karşılaşabilecekleri zorluklara yerinde ve yeterli tepkiler verememelerine yol açabilir. Kaliteli öğrenme deneyimi sağlamanın ana zorluklarından biri kaynaklara erişimdir. Öğretmenler, pahalı aygıtlar, elektronik bileşenler, kimyasal maddeler, tıbbi malzemeler vb. gibi deneylerde kullanılan pek çok araç gerecin kolaylıkla ve yeterli sayıda bulunamamasıyla sık sık karşılaşmaktadır. Bu araç gereçlerin sanal gerçekliğe aktarılan özdeş fiziksel özelliklere sahip 3B modeller halinde kopyaları (*dijital ikizleri*), öğretmenlerin normal laboratuvar dersleri sırasında uygulanması zor olan etkinlikleri sanal ortamda yürütmelerine olanak tanır. Böylelikle, sanal gerçeklik düşük maliyetli ve kullanıcı dostu bir deney ortamı sağlayarak bilhassa gelişmekte olan ülkelerde bahsedilen zorlukları aşmada çok faydalı olabilir [19][20].

Öğretmenlerin sınıfta kullanabilecekleri çok sayıda ilgi çekici sanal gerçeklik projesi, düşük maliyetli veya ücretsiz olarak erişilebilir halde mevcuttur [22]. Bunlara hayli iyi bir örnek, öğretmenin tüm sınıfını sanal geziye çıkarmasına olanak tanıyan Google Expeditions uygulamasıdır (Şekil 2). Bu uygulama, Kuzey Kutbu'ndaki buzullar veya İstanbul'daki Pera Müzesi gibi farklı farklı yerlerde özel kameralar vasıtasıyla kaydedilmiş 360 derecelik videolar ile öğrencilere bu yerlerin çevreyici bir sanal deneyimini verebilmektedir. Öğrenciler, Google Expeditions uygulamasını ücretsiz olarak indirip yükledikleri cep telefonlarını Google Cardboard isimli oldukça düşük maliyetli olan giriş seviyesi sanal gerçeklik kasklarının içine yerleştirerek bu deneyimden faydalanabilmektedir [23].



Şekil 2. İlkokul öğrencileri, sınıf öğretmenlerinin gözetiminde, mobil cihaz destekli çalışan ve oldukça düşük maliyetli olan Google Cardboard'ları kullanarak Google Expeditions uygulamasında sanal gerçeklik turlarını deneyimliyorlar [21].

Sanal gerçekliğin eğitim akışlarına birçok avantaj sağlayabileceğini, öğrenme ve öğretme deneyimlerini zenginleştirmeye yardımcı olabileceğini gösteren çalışmalar eğitimde sanal gerçeklikten faydalanma eğilimine destek olmaktadır [24]. Zira, araştırmalar göstermektedir ki sanal ortamlar, öğrencilerin geleneksel eğitim yöntemleri ile kazanmakta zorlandıkları becerileri geliştirmelerine izin verebilmektedir. Sanal gerçeklik deneylerinin fiziksel laboratuvarlarda yapılan deneylerden daha akılda kalıcı olabildiği saptanmıştır [25]–[27]. Ayrıca, kavramları sanal gerçeklik ortamında öğrenen öğrencilerin, geleneksel öğretim yöntemleriyle öğrenen öğrencilerden daha iyi performans gösterdiği keşfedilmiştir [28]. Öğrencilerin kavramları anlamalarında ve memnuniyetlerinde artış ve beraberinde eğitimler tarafından rapor edilen hatalarda ve tamamlama sürelerinde azalma görülmüştür. Çalışmanın sonuçları, sanal gerçeklikte öğrenme sayesinde öğrenciler için gelişmiş kavramların daha sindirilebilir hale geldiğine ve öğrencilerin gerçek dünyadaki mesleki zorluklara daha iyi hazırlanabildiklerine işaret etmektedir.

İlk, orta ve yüksek öğretimden 68 çalışmayı inceleyen bir derlemede edinilen bulgular, eğitimde sanal ortamları kullanmanın öğretme ve öğrenmeyi desteklediğini ortaya koymuştur [29]. Sanal ortamların pedagojik kullanımının, öğrenme performansını artırmak suretiyle öğrenim çıktılarına iyileştirebileceği belirtilmiştir. Ayrıca, artırılmış keyif ve iyileştirilmiş katılım seviyeleri gibi pedagojik katkılar da bildirilmiştir. Benzer bulgular, 21 çalışmayı inceleyen başka bir derleme tarafından da ortaya koyulmuştur [30]. Derlemede, sanal gerçekliğin bilişsel becerilere (hatırlama ve anlama), psikomotor becerilere (görsel veya gözlemsel) ve duyuşsal becerilere (duygusal kontrol) yönelik faydaları belirlenmiştir. Bununla birlikte, çevreyici deneyimin verilen öğrenme görevinden uzaklaştırıcı nitelikte olması durumunda sanal ortam kullanımının pedagojik açıdan bir katma değer yaratmayabileceği ifade edilmiştir.

Eğitimde yapılandırmacı yaklaşım, bilginin analizinin, sentezinin ve değerlendirmesinin kapsamlı bir öğrenme sağlamak üzere etkinleştirilmesini amaçlar [31][32]. Yapılandırmacı eğitim, öğrenme ortamına katılmayı ve bu ortamın deneyimlenmesini gerektirir. Bu doğrultuda keşfetmeyi teşvik eden aktif öğrenme ortamları oluşturmak için çeşitli öğrenme senaryoları, görevler, görseller ve işbirliği unsurlarından faydalanılır. Sanal gerçeklik sistemleri, aktif katılım ile birlikte çoklu algılar sağlar ve böylece yapılandırmacı eğitim paradigması için oldukça uygun öğrenme ortamları yaratmayı mümkün kılar [33].

Çevreyici sanal gerçeklik ile sunulan öğrenme ortamları, gerçek ortamların 3B fotorealistik temsiliyle birlikte kullanıcı hareketlerinin eş zamanlı olarak kaydı, doğal navigasyon ve iletişim, dolaysız kontrol ve kişiselleştirilmiş tekrarlı öğrenme imkanlarını sunar [34][35]. Çevreleme sayesinde, çoklu bakış açıları ve konumlu öğrenme sağlanması öğrenmeyi geliştirici potansiyel ortaya koyar [36]. Aktif katılım sunan fotorealistik bir sanal ortam, çevrelenmeyi artırır ve ortamın sağladığı çoklu uyaranlar algılarını geliştirir. Bu sayılan güçlü yönleriyle, yüksek nitelikte tasarlanan sanal gerçeklik uygulamaları bireylerin farklı bilişsel stillerdeki öğrenme mekanizmalarını destekleyebilmektedir. Bireyler, bu ortamlarda öğrenme senaryosundaki nesnelere doğrudan

ve anlık olarak kontrol edebilirler; sanal dünyadaki durumları deneyimleyebilir, gözlemleyebilir, keşfedebilir ve sentezleyebilirler; böylelikle bilgi aktarımı ve kazanımı süreçleri kolaylaştıkça üst-bilişsel süreçleri harekete geçirebilirler.

Sanal ortamlar, öğrencilerin motivasyonunu yükseltmekle birlikte öğrenme ve işleme becerilerini geliştirme, anlama ve hayal gücünü artırıp öğrenme sürecini kolaylaştırma potansiyeline sahiptirler [37]–[39]. Bireysel, deneyimsel ve keşif yüklü öğrenme ortamları sağlayarak bu potansiyeli gerçekleştirebilirler. Bu nitelikleri değerlendirmek üzere geliştirilen beyin-bilgisayar etkileşimli bir oyun sistemi, hem 2B hem de 3B sanal gerçeklik ortamlarında doğal kullanıcı deneyimleri ile test edilmiştir [40]. Sonuçlar, öğrenme mekanizmasının önemli bileşenleri olan işlerlik, çevreleme, konsantrasyon kolaylığı ve haz üzerinde 3B ortamın daha üstün etkileri olduğunu göstermiştir. İnsan beyni bilgi aktarmak için dopamin kullanır ve motivasyon faktörleri dopamin seviyelerini artırır. Deneyimlenen sanal ortamın canlı ve dinamik yapıda olması motivasyon sağlamak için başlangıçta yeterli olabilse de uzun süreli kullanımda dopamin mekanizmasının öğrenmeyi kolaylaştırmadaki devamlılığını sağlamak için motivasyonu artırıcı ilave tasarım bileşenlerine ihtiyaç ortaya çıkmaktadır [33].

Sanal gerçeklik tabanlı eğitim uygulamaları, öğrenme çıktılarına ve hedeflerine göre çevreleme seviyeleri ve bununla doğrudan bağlantılı olan donanım gereksinimleri bazında sınıflandırılabilirler [19]:

1. İlk tür sanal gerçeklik platformu, hatırlama ve anlama sağlamayı amaçlar. Bu platformlar, temel olarak belirli bir alandaki bilgi durumunu sunmak için kullanılır ve öğrencilerin teorik bilgi edinmelerini destekler. Bu nedenle, genellikle temel sanal gerçeklik düzeneği olarak tanımlanabilecek biçimde HMD veya benzeri gözlüklerle görsel olarak tecrübe edilip el kontrolörleri gibi temel bileşenlerle etkileşime geçilebilen standart çevreyicilikte düzeneklerin kullanımı yeterlidir.
2. İkinci tür sanal gerçeklik platformu, önceden edinilmiş bilgileri tipik bir durumda kullanılarak pratik beceriler edindirmeye yöneliktir. Bu tür senaryolar genellikle teorik bilginin sunumuyla başlar. Ardından bu ilk kısım, öğrenci tarafından pratik bir görev çerçevesinde uygulanır. Böyle bir platform, önceki türe nazaran daha derin bir çevreleme hissi ve kontrol gerektirir. Bundan ötürü kullanıcı hareketlerini yakalayan sensörler, sensörlü eldivenler veya sensörlü özel giysilere ihtiyaç duyulur.
3. Üçüncü türdeki sanal gerçeklik platformu, edinilen bilgilerin zor durumlarla ve problemlerle karşılaşıldığında nasıl kullanılacağını pratik yaptırarak öğretmeyi hedefler. Bu tür senaryolarda, teorik bilgi edinildikten sonra öğrencilerden zorlu görevlerle başa çıkmaları beklenir. Bu görevler, belli bir probleme çözüm formüle etme, yeni olguları analiz etme ve sentezleme, bir eylem planı oluşturma ve durumu belirli kriterlere göre değerlendirme gibi bileşenleri içerebilir. Bu tür senaryolar, çoğunlukla tıp ve mühendislik eğitiminde kullanılır ve özelleştirilmiş dokusal

(haptik) çözümlerle desteklenen daha gelişmiş ve yüksek hassasiyetli donanım sistemleri gerektirirler.

HMD ile tecrübe edilen sanal gerçekliğin, sağladığı daha yüksek çevrelemeden ötürü, diğer yaygın sanal gerçeklik sistemlerine kıyasla daha olumlu sonuçlara yol açabildiği gösterilmiştir [42]. Sanal ortamla daha yoğun biçimde çevrelenen bir kullanıcının, ortamdaki etkileşimlere daha hızlı tepki verdiği belirtilmektedir [43]. Bununla birlikte, HMD sanal gerçeklik cihazlarının kullanımı sonucu *siber hastalık* (ing. cybersickness) adı verilen hareket tutması, mide bulantısı, oryantasyon bozukluğu, solgunluk, terleme, göz yorgunluğu, baş dönmesi ve baş ağrıları gibi bir dizi olumsuzluklar görülebilmektedir [44]. Bu tür sorunlar, sanal gerçekliğin eğitimde beceri temelli öğrenme sonuçlarını iyileştirmek üzere yaygın bir araç olarak kullanımının önünde engel teşkil etmektedir. Bu nedenle, sayılan bu sorunların ortaya çıkışını önlemeye veya şiddetini azaltmaya yönelik etkin çözümlerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır [24].

Sanal gerçeklik, öğrencilerin kendi başlarına otonom biçimde çalışmaları için kullanılabilmesi gibi öğretim sürecine aktif olarak katılabilecek bir öğretmen eşliğinde de kullanılabilir. Örneğin, bir öğretmen veya rehber tarafından yürütülen ders esnasında sanal gerçeklik, dersi daha ilginç hale getiren bir araç olarak hizmet edebilir. Parkinson vd. [45] yaptıkları çalışmada coğrafya derslerinde sanal gerçeklik desteğinin potansiyel rolünü Google Expeditions kullanarak incelemiştir. Ders gözlemlerinin analizine göre, öğrencilerin normal derslere kıyasla daha fazla merak duydukları ve soru ürettikleri ortaya çıkmıştır. Ek olarak, öğrenciler tarafından sorulan soruların sanal gerçeklikle desteklenmeyen geleneksel yöntemdekilere kıyasla daha karmaşık olduğu ve analitik, etki yüklü veya değerlendirmeye teşvik edici gibi niteliklere sahip oldukları görülmüştür. Öte yandan, öğretim sürecini otomatikleştirmek üzere sanal bir öğretmen de kullanılabilir. Örneğin, Saadatzi vd. [46], otizimli öğrencilere okuma becerilerini kazandırmayı amaçlayan akıllı bir öğretim sistemi sunmuştur. Sistemde sanal bir sınıf, sanal bir öğretmen ve akran rolünde insansı bir robottan oluşturulmuş bir sanal ortam kullanılmıştır.

Eğitim amaçlı sanal platformlarda genellikle bir sınıf veya laboratuvar ortamı simüle edilir. Ayrıca, gerçek hayatta gerçekleştirilmesi çok zor veya tehlikeli olabilecek senaryoları test etmek için güvenli bir ortam sağlamak üzere ilgili senaryoların simüle edileceği başkaca ortamlar da geliştirilmektedir [41]. Okuldaki ders müfredatını desteklemek üzere, öğretimin gerçekliğini yansıtmak için çok kullanıcı sınıf uygulamaları oluşturmak cazip görünmektedir. Burada öğrenciler, birbirleriyle etkileşime girebilecekleri aynı sanal ortamda toplanmaktadır. Bu tür sanal sınıf ortamlarının, geleneksel sınıf ortamlarına kıyasla öğrencilerde bilginin kalıcılığını artırmada ve öğrencilere eğlenceli bir öğrenme deneyimi sağlamada etkili olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, katılan üniversite öğrencilerinin belirli mühendislik kavramlarını doğrudan görselleştirebildikleri ve daha iyi anlayabildikleri bildirilmiştir [47][48]. Melatti vd. [49], katılan öğrencilerin aynı sanal sınıf ortamını kullanarak birlikte tecrübe edebileceği interaktif derslerin öğretmenler tarafından kolayca hazırlanıp sunulabilmesi için bir sanal platform yazılım kiti geliştirmiştir. Oluşturulan derslerde, öğrenciler,

arkalarında bir sunum ekranı bulunacak şekilde sanal sınıfın ortasına yerleştirilir. Bu uygulamanın en önemli avantajlarından biri, zamanla geliştirilecek yeni sanal araçların ve içeriklerin ilgili yazılım kitine devamlı olarak eklenebilmesidir. Böylece kullanan tüm öğretmenlerin, istedikleri zaman bu kite ulaşabilmeleri ve yeni dersler oluşturmak için gereken araçları ve içerikleri çekebilmeleri sağlanmıştır. Sanal sınıf ortamlarının, geleneksel uygulamalı öğrenmeye ilişkin maliyet ve risklerde genel olarak düşüş sağladığı gösterilmişse de nihai amaçlarının geleneksel sınıf ortamlarının yerini tamamen almak olmaması gerektiği de belirtilmiştir [50][51].

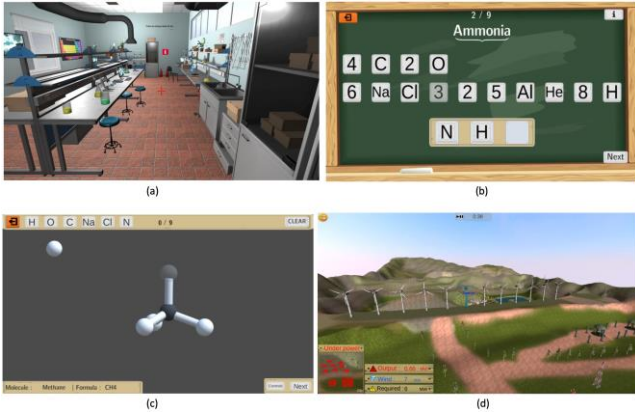
İlköğretimde sanal gerçeklik kullanımı

İlköğretim öğrencileri için çevreleyici sanal ortamların kullanımına ilişkin çalışmaların sistematik bir analizi, incelenen örneklerin bilgi ve beceri geliştirme açısından hem tipik hem de özel eğitim ihtiyaçlarını desteklediğini göstermiştir. Çevreleyici sanal ortamların ilköğretimdeki faydalarının özellikle beceri temelli eğitimde belirgin olduğu saptanmıştır [52].

İlköğretim süreci, çocukların karakteristik özelliklerinin ve düşünme tarzlarının şekillenmesinde oldukça önemlidir. Günümüzde, STEM eğitimi, çoğu ülkede erken eğitim stratejilerinin birincil itici gücü durumundadır. Sanal gerçeklik uygulamalarını deneyimlemek, öğrencilerin bilgisayar bilimlerine olan ilgilerini arttırmakta ve STEM paradigmasını desteklemektedir [53]. İlköğretim okulları için STEM eğitimini desteklemek üzere çeşitli sanal laboratuvarlar geliştirilmiştir. Herga vd. [54], gerçekleştirdikleri araştırmada yedinci sınıf öğrencileri için kimyasal deneyleri ve kavramları görselleştirmek üzere sanal bir laboratuvar kullanmıştır. Sonuçlar, dinamik gösteriler sayesinde öğrencilerin bilgilerinin arttığını belirlemiştir. Bogusevski vd. [55] tarafından ilköğretim fizik eğitimi için doğadaki su döngüsü sürecini göstermek üzere bir 3B sanal laboratuvar geliştirilmiştir. Katılımcılar bu ortamı faydalı ve keyifli bulmuşlardır. Diğer bir çalışmada [56], oyun analitiği kullanılarak kimya ve rüzgar enerjisi sanal laboratuvarları geliştirilmiş ve ayrıntılı takiple öğrencilerin davranış verileri tespit edilmiştir (Şekil 3). Sonuçlar, her iki sanal laboratuvarın da kullanıcıların karar vermesini ve öğrenme içeriğine uyum sağlamasını kolaylaştırdığını göstermiştir. Wrzesien ve Raya tarafından [57] pedagojik teoriler ve müfredat hedefleri göz önünde bulundurularak doğa bilimleri ve ekoloji eğitimi için sanal bir dünya geliştirilmiştir. Çalışma sonuçları üzerinde yapılan analiz, öğrenme etkinliği açısından test ve kontrol grupları arasında anlamlı bir fark olmadığını, ancak test grubunun motivasyonel faktörlerinin arttığını göstermiştir.

Kullanımda olan en yaygın sanal gerçeklik projelerinden biri, STEM eğitimini desteklemek için Newcastle Üniversitesi tarafından Minecraft oyunu baz alınarak oluşturulan VR School uygulamasıdır [58]. Diğer bir uygulamada, Olmos-Raya vd. [59], ortaokul öğrencilerine tarımın doğuşunu, Avrupa'daki salgınları ve sanayi devrimini öğretmek için hem çevreleyici hem de çevreleyici olmayan sanal gerçeklik öğrenme ortamları geliştirmiştir. Çalışmada, HMD tabanlı çevreleyici sanal gerçekliği ve tablet tabanlı çevreleyici olmayan sanal gerçekliği kullanan öğrenciler arasındaki motivasyonel farklılıklar araştırılmıştır. Sonuçlar, her iki

sanal gerçeklik türünün de motivasyon üzerinde olumlu etkileri olduğunu göstermiştir. Çevreye sanal gerçekliğin, çevreye olmayan kıyasla öğrencilerin duygusal durumu ve bilgi tutma süreci üzerinde önemli ölçüde daha olumlu etkiye sahip olduğu görülmüştür. Çakıroğlu ve Gököğlu [60], küçük çocukları yangın güvenliği konusunda eğitmek için SecondLife 3D bazlı bir oyun ortamı oluşturup HMD tabanlı sanal gerçeklik teknolojilerine entegre etmişler ve bu ortamı 9-11 yaş aralığında on çocuğa uygulayarak değişen davranış durumlarını gözlemlemişlerdir. Sonuçlar, çocukların olumlu öğrenme çıktılarını elde ettiğini ve bilgilerini gerçek yaşam durumlarına aktarabildiğini göstermiştir. Ayrıca, sanal gerçeklik ortamının sağladığı bulunuşluk düzeyi ile becerilerin gerçek yaşam koşullarına aktarım düzeyi arasında önemli bir ilişki tespit edilmiştir.



Şekil 3. Migkotzidis vd. [56] tarafından geliştirilen oyun bazı sanal gerçeklikte eğitim uygulamasından kareler: (a) Sanal kimya laboratuvarı (b) Formül bulma oyunu (c) Molekül oluşturma oyunu (d) Rüzgar çiftliği kurulu simülasyon alanı.

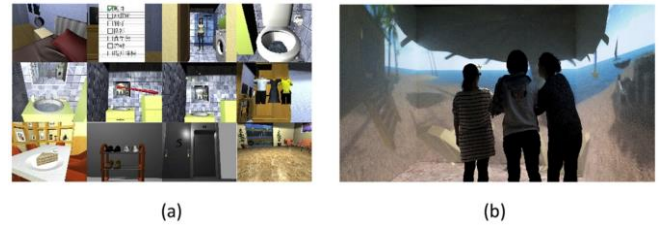
Öte yandan, HMD bazlı çevreye sanal gerçeklik donanımlarının ilköğretimde kullanılması çeşitli zorluklar da ortaya koyabilmektedir. İlköğretim öğrencileri yetişkinlere nazaran daha küçük kafa ölçülerine sahiptir ve bu bakımdan standart donanımlar yerine ölçülerine uygun ergonomide tasarlanmış kasklara veya gözlüklere ihtiyaç duyarlar. Küçük çocukların HMD'lerde bulunan hassas teknolojilere zarar verebilmeleri büyüklere kıyasla daha olasıdır. İlköğretim öğrencileri, sanal dünyayı keşfetmek için çok hevesli, enerjik ve heyecanlı olabilirler. Bu da pahalı HMD'lerin serbest kullanım yerine genellikle öğretmen gözetimi gerektirmesi anlamına gelir. Kolayca hasar alma olasılığı daha düşük ve değiştirilmesi daha ucuz olan mobil entegre HMD'ler (Şekil 2) küçük öğrenciler için genellikle daha iyi seçeneklerdir [33].

Özel ihtiyaçlı bireylerin eğitiminde sanal gerçeklik kullanımı

Sanal gerçekliğin özel ihtiyaçlı bireylerin öğrenme süreçlerini destekleyen bir araç olarak faydaları literatürde giderek daha fazla kabul görür hale gelmektedir. Birçok araştırma, bu teknolojinin otizm spektrum bozukluğu (OSB) olan çocukların davranışsal, iletişimsel ve sosyal becerilerini geliştirmedeki kritik rolüne işaret etmektedir [61].

Çevreye sanal gerçeklik ortamları, dezavantajlı öğrencilerin fiziksel dünyayı erken yaşta öğrenme

süreçlerinde ihtiyaç duyulan uyum mekanizmalarına destek sağlayabilirler. Bu olanak, Ip vd. [62] tarafından OSB olan çocukların duygusal ve sosyal uyum becerilerini artırmak için dört taraflı CAVE teknolojisini kullanarak geliştirilen sanal gerçeklik uygulaması ile ortaya konulmuştur (Şekil 4). Ekip, OSB olan öğrencilerin anaokulundan ilkokula geçiş sürecini kolaylaştıran altı adet farklı öğrenme senaryosu oluşturmuştur. Bu senaryolar, duygu kontrolü ve gevşeme, çeşitli sosyal durumların simülasyonu, konsolidasyonun ve genellemenin kolaylaştırılması hedeflerine yönelik olarak çeşitlendirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, bu uygulamayı güvenli ve kontrol edilebilir çevreye sanal gerçeklikte 14 hafta boyunca kullandıktan sonra, katılan öğrencilerin duygu tanıma, etkili ifade etme ve sosyal karşılıklık becerilerinin geliştiğini göstermiştir.



Şekil 4. OSB olan çocukların duygusal ve sosyal uyum becerilerini geliştirmek için oda içinde dört taraflı projeksiyonla sağlanan CAVE teknolojisini kullanarak geliştirilen sanal gerçeklik uygulamasının (a) senaryo içeriklerinden örnek kareler, (b) OSB olan çocuklar ile öğretmenin eşliğinde kullanımı [62].

Diğer bir çalışmada, yaşları 7 ile 12 arasında değişen OSB olan çocukların duygusal becerilerini geliştirmek için çevreye bir sanal gerçeklik ortamı geliştirilmiştir [63]. Bu ortamda, sosyal durumlar için on farklı öğrenme senaryosunu görselleştirmek üzere yarı-CAVE (L-şekilli duvar-ekran) projeksiyonundan faydalanılmış ve yüz ifadelerini tanıma yoluyla çocukların mevcut duygusal durumlarını ve ruh hallerini belirlemek için el-göz kamera sistemine sahip bir robot kullanılmıştır. Bu sistemle, çocukların davranışlarının uygunluğu otomatik olarak değerlendirilmiştir. 40 çocuk katılımcıyla, her katılımcının 40 seansı tamamladığı ve 10 ay süren çevreye sanal gerçeklik uygulamasının ardından, katılan çocukların duygusal davranışlarının önemli ölçüde gelişme gösterdiği raporlanmıştır.

Öte yandan, Arter vd. [64] tarafından yapılan çalışmada sanal gerçeklik OSB olan lise öğrencilerinin iş görüşmesi becerilerini geliştirmek için kullanılmıştır. Benzer şekilde, Burke vd. [65], sanal etkileşimli bir eğitim aracının otizmli ve gelişimsel engelli kişilerin iş görüşmesi becerilerini geliştirip geliştiremeyeceğine ilişkin bir araştırma ortaya koymuştur. Tüm katılımcılar güçlü yönleri belirleme, kendini geliştirme, kendini savunma, durumsal soruları yanıtlama ve davranışsal/sosyal sorulara yanıt verme becerilerini geliştirdiğinden, çalışmanın sonuçları hayli umut verici olmuştur.

Tıpta sanal gerçeklik uygulamaları

Teknoloji, sağlık hizmetlerini daha kolay, daha hızlı ve daha erişilebilir hale getirmektedir [66]. Önümüzdeki yıllar içinde dijital sağlık bilgilerinin rutin klinik uygulamalara kusursuz

entegrasyonunun sağlanması beklenmektedir. Hastaneler muazzam miktarda hasta verisi üretmekle birlikte çok yönlü bilgi ve eğitim kapasitelerine sahiptirler. Yine de genellikle mevcut bilgilerin yalnızca bir kısmı herhangi bir zamanda hasta bakım sürekliliğine veya tıp eğitimine uygulanmaktadır. Sanal gerçeklik, gerçek dünya ile dijital dünya arasındaki engelleri ortadan kaldırarak dijital bilgilerle etkileşime geçmek için benzersiz bir araç sunmaktadır. Dijital sağlık hizmetlerini klinik uygulamalarla entegre etme kapasitesinin artması, daha iyi hizmet sunumuna ve daha iyi tıbbi sonuçlara yol açabilecektir. Sanal gerçeklik teknolojileri ve beraberindeki yazılımlar, tıp ve sağlık uygulamalarının özel taleplerini karşılamak için hızla gelişmekte ve bakımı hastanenin fiziksel sınırlarının ötesine geçerek topluma entegre ederken aynı zamanda hasta bakım izleğini bütünleştirerek hem hastane içinde hem de dışında temel platform teknolojileri haline gelmeye başlamışlardır. Öyle ki, Greenleaf'e göre sanal gerçeklik için en derin ve önemli pazar klinik bakımda ve sağlık sektöründe olacaktır [67].

Tıbbi bağlamda, sanal gerçeklik, sağlık hizmetleri bilgilerini gerçek zamanlı olarak entegre etme, görselleştirme, etkileşimde kullanma ve paylaşma potansiyeli sunar. Dijital sağlık yazılımı ve donanımı çözümleriyle birlikte sanal gerçeklik, insanlar, veriler ve makine arasında daha akıcı etkileşimler sağlama potansiyeline sahiptir. Dijital bilgiyi gerektiği yere verimli ve uygun bir şekilde yerleştirme olanağı, kullanıcının dikkatini eldeki göreve daha iyi odaklamasını sağlayacaktır. Uygun kullanıcı arayüzleri ile birleştiğinde, bu özellik aynı zamanda dijital bilgilere erişim karmaşıklığını azaltabilir ve hasta verilerini ilgili uzamsal bağlamda araştırmak ve analiz etmek için daha doğal ve sezgisel bir yöntem sağlayabilir [68].

Ayrıca, sanal gerçeklik tıbbi beceri geliştirme, tedavi planlama ve uygulama, hastayı bilgilendirme ve iyileştirme, rehabilitasyon için gelişmiş minimal invaziflikte sağlık hizmetleri sağlama ve performans artırıcı uygulama amaçlarıyla da kullanılabilir. Halk sağlığı ve cerrahi iş akışlarında 3B teknolojilerin benimsenmesini savunan araştırmacılar ve klinisyenlerin çabalarıyla sağlık hizmetlerinde sanal gerçekliğin kullanımına ilişkin literatür hızla büyümektedir [69][70]. Yenilikçi sanal gerçeklik uygulamaları, araştırmacılar ve geliştiriciler tarafından yeni teknolojik yeteneklerle desteklenmeye devam ettikçe, rutin klinik pratikte kullanılan mevcut yöntemlerin iyileştirilmesine veya yerlerine daha etkili çözümlerin getirilmesine imkan kılacaktır.

Operasyon planlaması ve perioperatif bağlamlarda sanal gerçeklik kullanımı

Sanal gerçeklik, hastaya özgü verileri sanal ortama aktararak entegre etmeyi ve gerçekçi 3B etkileşimler aracılığıyla daha net gözlemlerde bulunmayı sağlar. Böylece, tıbbi prosedürlerin bağlamsal ve ayrıntılı bir şekilde önceden planlanmasına, olası vakaların daha iyi tanımlanmasına, operasyon sonrası işbirliğine ve gelişmiş uzaktan etkileşime imkan vermektedir.

Cerrahlar, operasyon hazırlığı için hastaya dair bir dizi 2B görüntüleri ve bilgileri baz alırlar. Hasta görüntülerinin bu 2B projeksiyonları, cerrahların bunlardan yola çıkarak hastaya dair 3B görüntüleri zihinlerinde oluşturmalarını ve

beraberinde prosedürü olası komplikasyonlarıyla birlikte hayal ederek tasarımlarını gerektirir. Birçok araştırma ve klinik proje, bilgisayarlı tomografi taramaları (BT), manyetik rezonans anjiyografi ve manyetik rezonans görüntüleme verileri gibi tıbbi görüntüleme bilgilerinin çok boyutlu keşfi bağlamında sanal gerçeklik kullanımını irdelemiştir. Amaç, karmaşık görüntüleri 3B olarak yeniden yapılandırma, görselleştirme ve prosedürleri simüle etme yeteneği ile tanı ve tedavi planlamasının bilgiye dayalı geliştirilmesini sağlamaktır. Hastaya özel karmaşık bir prosedürün provası yapılabileceği ve farklı senaryolar öngörülebileceği için bu özellikle cerrahi planlama bağlamında hayli önem teşkil eder [68].

Sanal gerçeklik simülasyonları, cerrahi tekniklerin bilgisayarlı görselleştirmeye dayanarak uygulanmasına izin veren sistemlerdir. Cerrah veya cerrahi stajyeri, bir dizi bilgisayarlı görüntüyü manipüle etmek için çeşitli araçlar kullanır ve böylece sanal bir ortamda ameliyatı gerçekleştirir. İlk sanal gerçeklik simülatörleri, Aşil tendonu onarımı, kolesistektomi, yara debridmanı ve dikiş atma uygulamalarını içermektedir [71]–[73]. Bu sanal gerçeklik simülatörleri, önceki bilgisayarsız simülasyon modellerinden farklı olarak, güvenli, etik ve tekrarlanabilir olmalarıyla öne çıkmışlardır. Zamanla, sanal gerçeklik simülatörleri üzerine yapılan kapsamlı klinik araştırmalar ve yeni teknolojilerin entegrasyonu, giderek daha etkili ve çok yönlü modellerin geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır. Örneğin, MIST-VR (Sanal Gerçeklikte Minimal İnvazif Cerrahi Eğitmeni) ve laparoskopik ameliyathaneler için geliştirilen diğer sanal gerçeklik simülatörlerinin ameliyathanedeki performansını iyileştirdiği gösterilmiştir [74][75]. Bugün, bazı sanal gerçeklik simülatörleri, ameliyathanedeki kullanılan gerçek cerrahi araçları son derece fotorealistik olan bilgisayar üretimi sentetik görüntülerle birleştirmektedir. Bu hibrit simülatörler, tüm işlemleri yüksek doğrulukla taklit edebilmektedirler [76].

Anatomik olarak yüksek doğruluğundaki sanal gerçeklik simülasyonları, hastaya özel anatomi üzerinde çalışma imkanı sunarak insan hatası riskini büyük oranda azaltır ve sadece ekip üyeleriyle değil aynı zamanda bizzat hastalarla da cerrahi planın görsel iletişimine olanak tanır [78]. Pankreatektomiler, hepatektomiler, böbrek cerrahisi ve el cerrahisinde kullanılmak üzere hastaya özel simülatörler ortaya çıkmıştır [77]–[79]. Makiyama vd. [77] tarafından tanımlanan böbrek cerrahisi simülatöründe, 2B BT görüntüleri kullanılarak simülatörde hastanın böbreği 3B olarak yeniden üretilir (Şekil 5). Bu, operasyona girecek cerrah için hastanın anatomik varyasyonlarının doğru temsillerinden faydalanarak ameliyat öncesinde laparoskopik prosedürleri sanal bir ortamda risksiz biçimde uygulayabilmesine olanak tanır. Simülatörün genel doğruluğu yüksek bulunmuş; tümörler, ureterler, renal arterler ve damarlar gibi yapıları %95 ile %100 arası doğrulukla verebildiği tespit edilmiştir. Bu simülasyonları oluşturmak için gereken süre nispeten kısadır. Hepatektomi ve pankreatektomi simülatörleri için gereken hazırlık yaklaşık 2,5 saat sürmektedir [78]. Bulgular göstermektedir ki, sanal gerçeklik simülatörleri karmaşık prosedürlerin ameliyat öncesi planlaması için etkili araçlar olabilmektedir. 3B yazıcılardan farklı olarak, kolayca yeniden kullanılabilirler ve kaynakları tüketmezler. Sanal gerçeklik simülatörlerinin bu özellikleri, klinik kullanımını daha da desteklemektedir [80].



Şekil 5. Laparoskopik böbrek cerrahisi için kullanılan hastaya göre özelleştirilebilen sanal gerçeklik simülatörü [77].

Tıp eğitiminde sanal gerçeklik kullanımı

Simülasyonun tıp eğitimi çerçevesinde beceri, bilgi ve tutum gelişimine yardımcı olduğu uzun zamandır bilinmektedir [81]. Anatomi öğrencileri, sanal gerçeklik eğitiminin güvenli, etkili ve esnek olması sayesinde insan vücudunun farklı sistemlerini üç boyutlu olarak görselleştirebilir ve pratik becerileri standart bir şekilde öğrenebilirler [82]. Gerçek muadillerine yüksek sadakatte olduğu için suni görünmeyen sanal gerçeklik ortamları, içerik ve iletişim sürecini kesintiye uğratmadan öğrenmeye yardımcı olmaktadır [83].

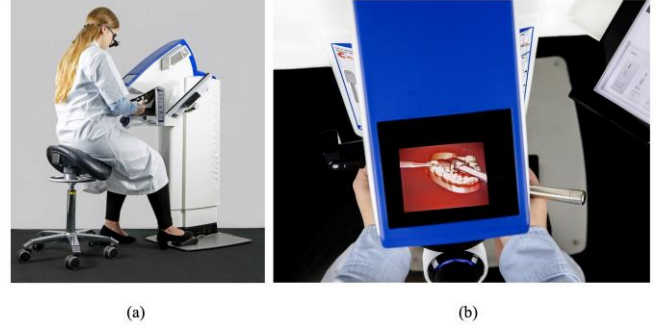
Özellikle, tıp eğitimi alanında sanal ortamların kullanımı son yıllarda yaygın hale gelmiş, çokça çalışılmış ve çeşitli literatür taramalarına konu olmuştur [84]–[91]. Elde edilen bulgularda, sanal ortam uygulamalarının geleneksel öğrenmeyi desteklemek ve performansı artırmak için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [92]–[94].

Cerrahi pratiğindeki karmaşıklıklar, cerrahlar tarafından nesilden nesile aktarılan araçları ve yöntemleri kullanarak, bunları gelişen uygulama yaklaşımının gerçeklerini yansıtmak için yeri geldiğinde değiştirerek ve zaman zaman miadı dolmuş olanı tamamen yenisiyle ikame ederek ele alırlar. Klinik uygulama geliştikçe, eğitim yöntemleri de benzer şekilde gelişmiştir. Genel olarak, cerrahi eğitimin tüm seviyelerinde hedef yetkin klinik uygulamaya ulaşmaktır. Bununla birlikte, teknolojik ilerlemeler, tıbbi bakım için toplumdan gelen erişim, kalite ve güvenliğe dair talepler ve gelişen bir yetkinlik anlayışı, cerrahi eğitimdeki mevcut durum ve eğilimlere katkıda bulunan önemli ve birbiriyle bağlantılı itici güçler olmuştur [95].

Sanal gerçeklikte cerrahi becerisi ve karar verme eğitimi, özellikle çevreyici sanal gerçeklik yoluyla geliştirilir [96]. Cerrahide uzmanlık edinimi ve incelikli pratik kazanımı için en başta psikomotor, otomatizite ve profesyoneller arası iletişim becerileri gereklidir [97][98]. Prosedürler beceriye, kurala ve bilgiye dayalıdır [99]. Bunların ilk ikisi, ex vivo veya in vivo hayvan modelleriyle makul ölçüde iyi öğretilenmiştir; ancak karmaşık görevler ve prosedürler için çok modlu çevreyici sanal gerçeklik kullanımı giderek daha gerekli görülür hale gelmektedir. Hayli stresli olabilen ve

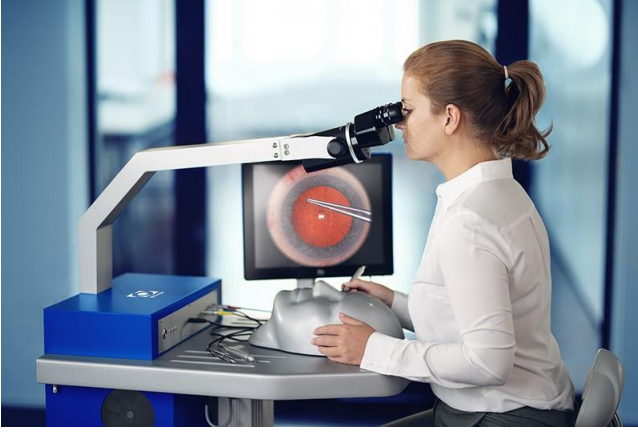
dikkat gerektiren cerrahi ortamın simülasyon ile tecrübe ettirilmesi, iletişim, stres yönetimi ve ekip çalışmasını öğretmek için de yararlıdır [100].

Alfalah vd. [102], etkileşimli bir ortamda kalp yapısının gerçek zamanlı 3B temsilini veren bir sanal gerçeklik sistemi sunmuştur. Sistem, kalbin farklı bölgelerinin anatomik ilişkilerinin gerçekçi gösterimi için serbest manipülasyon ve sökülebilir modeller gibi etkileşimlere izin vermektedir. Modelin çeşitlenen yapısının gerçekçi bir temsilini elde etmek için hafif abartılı farklı ten rengi tonları kullanılmıştır. Böylece, kalp yapısının karmaşıklığını anlamaya yardımcı olması ve kalbin farklı bölümlerinin anatomik ilişkilerini netleştirilmesi amaçlanmıştır. Wang vd.'nin [101] çalışmasında, diş tacı hazırlama eğitimi için geliştirilmiş 3B sanal gerçeklik simülasyon sistemi olan Simodont tanıtılmıştır (Şekil 6). Bu simülatör, diş hekimliği öğrencilerinin ve protez asistanlarının hem süre hem de beceri açısından gelişimini sağlayabilmekte; böylelikle bir öğretim aracı olarak geçerlilik sağlamaktadır. Gerçekçi klinik durumlar sunduğu için öğrencilerin fantom uçlarla veya plastik mankenlerle yapılandırılan daha kapsamlı bir şekilde pratik yapmalarına olanak tanır.



Şekil 6. (a) Simodont dişçilik eğitimi simülatörü (b) Bir öğrenci Simodont'u kullanarak dokunsal geribildirimli diş hazırlama egzersizi gerçekleştiriyor [101].

Vankipuram vd. [103], gelişmiş kardiyak yaşam desteği için sanal gerçeklik tabanlı bir eğitim simülasyonu geliştirmişlerdir. Simülasyon, esas olarak hastaların hayatını kurtarma pratiği edinmesi gereken yeni oluşturulmuş klinisyen ekiplerine yönelik hazırlanmıştır. Bu hedefle geliştirilen simülasyon senaryosu, kalp durması ve solunum yetmezliği sırasında yapılan klinik müdahaleler hakkında rehberlik sağlayan, zamana duyarlı ve ekip bazlı tıbbi görevlerden oluşmaktadır. Harrison vd. [104] tarafından ele alınan bir diğer uygulamada, ameliyat sonrası enfeksiyonun önlenmesinde kazanımı çok önemli bir pratik olan cerrahi el hazırlığı öğretimini iyileştirmek hedeflenmiştir. Radia vd.'nin [105] çalışmasında sunulan VRmagic Eyesi Oftalmik Cerrahi Simülatörü (Şekil 7), gerçek hayattaki katarakt ve vitreoretinal cerrahiye uygulanabilecek psikomotor becerilerin kazanılması ve mikrocerrahiye uygun uzamsal farkındalık geliştirilmesi için gerçekçi bir ortam sağlar. Bu simülatör ile, oftalmi eğitimine yeni başlayan cerrahlara emniyetli bir ortamda hastanın gözünü güvenli biçimde ele alma tecrübesi edinmede ve ameliyathane endişesini gidermede yardımcı olunması amaçlanmıştır.



Şekil 7. Öğrenci, VRmagic Eyesi Oftalmik Cerrahi Simülatörü'nü kullanarak katarak ameliyatı eğitimi alıyor [105].

2018 tarihli bir literatür incelemesinde [93], önceden endoskopik deneyimi olmayan stajyerler için erken geleneksel endoskopi eğitiminin, sanal gerçeklik simülasyonu temelli eğitim ile tam olarak ikame edilemeyeceği ancak sanal gerçeklik eğitiminin geleneksel eğitimi tamamlayıcı faydaları olduğu sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde, cerrahi stajyerler için yapılan sanal gerçeklik eğitiminin laparoskopik cerrahideki kullanımlarının potansiyel yararlarını ve zararlarını değerlendiren 2008 tarihli bir diğer incelemede [87], geleneksel eğitime ilave olarak yapılan sanal gerçeklik eğitiminin çalışma süresini azalttığı ve sınırlı laparoskopik deneyime sahip stajyerlerin hem hiç eğitimi olmayanlarla hem de geleneksel, gözetimli, veya hasta tabanlı eğitimi olanlarla karşılaştırıldığında ameliyat performansını geliştirdiği sonucuna varılmıştır. 1969'dan 2003'e kadar 34 yıl boyunca yayınlanan ilgili çalışmaları kapsayan sistematik bir inceleme [88], yüksek doğrulukta simülasyona dayalı tıp eğitiminin kullanımına odaklanarak, bu tür kullanımların eğitimsel olarak etkili olduğu ve geleneksel tıp eğitimi tamamladığı; ancak alandaki araştırma titizliğinin ve kalitesinin iyileştirilmesinin gerekli olduğu sonucuna varmıştır.

Güncel görünüm, zorluklar, öneriler ve öngörüler

Sanal gerçekliğe ilginin yüksek olduğu ve artmaya devam edeceği açıktır. Teknolojinin yenilikçi kullanımlarının günümüz popülasyonlarında, özellikle de teknolojik gelişmeleri yakından takip eden ve bunları hızlı bir şekilde benimseyebilen genç yetişkinlerde önemli faydalar sağlayabileceği görülmektedir [106]. 2015 yılında yapılan bir ankete göre [107], 30 ila 39 ve 20 ila 29 yaş aralıklarındaki bireylerin sırasıyla %76 ve %77'si sanal gerçekliğe ilgi duyduklarını belirtmiştir. Bu rakam, 14 ila 19 arası yaş grubunda ise %96'ya yükselmiştir. Dolayısıyla, bu noktada esas soru, sanal gerçekliğin ileride yaşantımızın standart bir parçası olup olmayacağı değil; yaşantımızın hangi alanlarında ne zaman ve nasıl standart olacağıdır [108].

Sanal gerçekliğin farklı algı yollarını bir arada harekete geçiren ilgi çekici ortamlar sağlayarak olumlu sonuçlar almaya izin veren büyük bir potansiyele sahip olduğu pek çok

araştırma tarafından defaatle ortaya konulmuştur. Ancak bu çalışmaların önemli bir kısmının eski teknolojileri kullanarak gerçekleştirildiğini göz önünde bulundurmak gerekir. Sanal gerçeklik teknolojilerindeki gelişmeler ışığında, modern sanal gerçeklik donanım ve yazılımlarını kullanarak gerçekleştirilecek kapsamlı yeni araştırmalar büyük önem taşımaktadır. Ayrıca her insanın benzersiz olduğu ve farklı sanal gerçeklik algısına sahip olabileceği de dikkate alınmalıdır. Bu nedenle özellikle çocuklara veya dezavantajlı bireylere yönelik sanal gerçeklik senaryoları doğru bir şekilde incelenmeli ve değerlendirilmeli, geliştirme süreçlerinde uygun sahaların profesyonellerine danışılmalıdır.

Sanal gerçeklik için en önemli zorluklardan biri, gerçek zamanlı etkileşimi sağlarken oluşturulan sahneyi mümkün olduğunca yüksek fotogerçekçilikte temsil etmektir. Psikogörsel olarak, insan beyninin işleyişi, gerçekçi olmayan küçük ayrıntıları bile tespit etmemizi sağlar ve sanal gerçeklik deneyimi sırasında bunların algılanması zihinsel çevrelemeyi kolayca bozabilir. Ancak, görüntüleme teknolojileri ve sanal gerçeklik grafiklerini üretmek için kullanılan mevcut teknikler sınırlıdır. Bu nedenle, fotogerçekçi görüntü üretimi ve gerçek zamanlı etkileşim arasında bugün hala bir ödünleşimde bulunmak gerekmektedir. Sanal sahne, bir *3B grafik yazılım arayüzüne* (ing. 3D graphics API) dayalı olarak oluşturulur. Modern grafik yazılım arayüzleri, sanal sahnedeki her bir nesneyi adına üçgen ağ denen bir üçgenler topluluğu olarak temsil eder. Bunun sebebi, birbirine bağlı bir üçgen ağı üzerinde çalışmanın bir grup birbirinden bağımsız üçgen üzerinde çalışmaktan daha verimli olmasıdır. Artan sayıda üçgenlerle, sanal nesneye daha fazla ayrıntı gömülebilir; ancak bu artış, sahneyi oluştururken daha yüksek bir hesaplama maliyeti ile sonuçlanır. Bu durum gerçek zamanlı etkileşimin sağlanmasını tehlikeye atabileceği için oluşturulan sahnenin karmaşıklığının dikkate alınması gerekir. Ayrıca, fiziksel fenomenlerin (örn. doğal akış, sıvı-sıvı etkileşimleri ve katı-sıvı etkileşimleri), deforme olabilen katı nesnelerin ve sanal kameradan uzaklığa bağlı uygun ayrıntı düzeyinin simülasyonlarında da gerçek zamanlı hesaplama açısından önemli zorluklar vardır.

İnsan faktöründen kaynaklı problemler ve fiziksel yan etkiler, sanal gerçeklikte bugün de devam eden diğer bazı zorluklardır [41]. Bazı çalışmalar, HMD kullanımının kaygı, stres, izolasyon ve olumsuz ruh hali değişiklikleri gibi istenmeyen fiziksel/fizyolojik yan etkilere yol açabileceğini öne sürmüştür [109]. Ayrıca, sanal ortamda simüle edilen hareketlerin kişinin fizyolojik hareket algısıyla uyumsuzluğu, kişinin zaman ve mekan algısını etkileyerek siber hastalık adı verilen semptomlara neden olabilir [110]. Örneğin, Regan'ın çalışmasında [111] 150 denek, çevreyici bir sanal ortamda 20 dakika boyunca siber hastalık için test edilmiştir. Deneklerin %61'i, 20 dakikalık çevreyici tecrübe esnasında ve 10 dakikalık çevreyici tecrübenin sonrasında siber hastalık semptomları bildirmiş; %5'i de şiddetli siber hastalık semptomları nedeniyle deneyi bırakmak zorunda kalmıştır. Bu tür yan etkileri azaltmak için sanal gerçekliğe adaptasyon egzersizleri önerilmektedir. Kullanım sırasında oluşabilen doğal olmayan postürler, kardiyovasküler ritim üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir [109]. HMD ile sanal gerçeklik tecrübesinde kullanılan stereo kamera çiftinin ayarları iyi yapılmadığı takdirde kullanıcının 3B görsel algısında

akomodasyon ile yakınsama mekanizmalarının rahatsız edici düzeyde ayrışmasına neden olabilir [112].

Eğitim sistemleri sürekli devinim ve gelişim halindedir. Eğitimde kullanılan yaklaşımlar, her zaman mevcut teknolojiye ve öğrencilerin ihtiyaçlarına göre yeniden ele alınıp uyarlanagelmiştir. Günümüz itibariyle yine bir dönüşümün eşiğinde bulunuyoruz. Bu dönüşümü benimsemek ve gerekli hazırlıkları yapmak bilim insanlarının ve eğitimcilerin görevidir. İlköğretime yeni başlayan veya devam etmekte olan nesil, tüm yaşamları boyunca çevrimiçi olagelmiştir. *Z kuşağı* olarak adlandırılan bu yeni nesil için dijital dünya, gerçek dünya kadar önemli ve sürükleyicidir. Zira onlar, cep telefonları, tablet bilgisayarlar, hemen her yerden erişilebilen internet ve istenen bilgi, veri, müzik, video vd. içeriğe anında erişim dünyasında doğmuş dijital yerlilerdir. Bu bakımdan, *Z kuşağının* eğitiminde, katılımı en üst düzeye çıkarmak için oldukça farklı yöntemlere ihtiyaç vardır. Teknoloji temelli yeni yaklaşımlara olan eğilimleri sayesinde, sanal gerçeklik, *Z kuşağı* ve ötesinin eğitiminde anahtar bileşenlerden biri olmaya adaydır.

Eğitimde sanal gerçeklik teknolojilerini kullanmanın kanıtlanmış pek çok avantajı vardır. Her şeyden önce, sanal gerçeklik, geleneksel sınıflarda elde edilemeyen olağanüstü bir görselleştirme imkanı sağlar. Genç nesillerin kendilerini rahat hissettikleri dünyayı yansıtır. Kapsayıcıdır; herkesin eğitim sürecine katılmasına izin verir. Sınıfta kullanılan modern teknoloji, ilgiyi artırır, işbirliğini ve katılımı teşvik eder. Yüksek verimli karma öğrenme ve kendi kendine çalışmayı teşvik etme için kullanışlıdır [19].

Eğitimle ilgili çalışmalar üzerine gerçekleştirdiğimiz gözden geçirme, sanal gerçekliği öğretimde uygulayan araştırma alanlarının çeşitliliğine işaret etmektedir. Sanal gerçekliğin geleneksel eğitim yaklaşımlarına tamamlayıcı bir öğretim ve öğrenme ortamı olarak kullanılması, bilişsel, beceri temelli ve duyuşsal öğrenme çıktıları için olumlu sonuçlar ve faydalı etkiler sunmaktadır. Sanal gerçeklik, araştırmacıların çoğu tarafından, özellikle de yüksek öğretim için, umut verici bir öğrenme aracı olarak ele alınmıştır. Fakat hala daha yeterli kullanım olgunluğuna erişemediği açıktır. İncelenen makalelerin çoğunda açıklanan teknolojiler deneysel durumda kalmış ve çoğunlukla sadece performansları ve kullanılabilirlikleri açısından test edilmişlerdir. Ayrıca çok az sayıda tasarım odaklı çalışmanın, sanal gerçeklik uygulamalarını teknik geliştirme rehberliği görevi gören belirli bir öğrenme teorisine dayalı olarak yapılandırıldığı görülmüştür. Benzer şekilde, sanal gerçeklik temelli öğretimin müfredat içinde nasıl benimsenebileceğini ayrıntılı olarak ele alan az sayıda makale bulunmaktadır.

Bu gerçekler, çevreyici sanal gerçeklik teknolojilerinin öğretimde kitlesel olarak benimsenmesinin önüne geçmektedir. Mühendislik ve bilgisayar bilimleri gibi bazı alanlarda, belirli becerileri, özellikle kavramsal, prosedürel veya pratik bilgi gerektiren konuları, öğretmek için sanal gerçeklik uygulamalarının sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, sanal gerçeklik bazı eğitim, çoğu alanda hala deneysel durumdadır ve kullanımı sistematik veya en iyileştirilmiş örnek uygulamalara dayalı değildir. Sanal gerçeklik uygulama geliştiricileri ve yüksek öğretimdeki eğitimler, mevcut literatürden sağlanacak

çıkartımlar ve içgörülerden beslenerek sayılan eksikleri giderecek iyileştirmelerde bulunabilirler [113].

Sanal gerçeklik ortamlarını gerçek zamanlı olarak yüksek fotogerçekçilikte sağlamak için, hesaplama açısından güçlü donanımlar gerekmektedir. Şu anda, Oculus Quest 2 ve HTC Vive gibi üst segment HMD sanal gerçeklik sistemleri eski muadillerine kıyasla daha az alan işgal ederek çok daha düşük maliyetler gerektirirler de [114], sırasıyla, yaklaşık 300\$ ve 800\$ civarında seyreden fiyatları geleneksel öğretim yöntemlerinin maliyetlerine kıyasla halen daha oldukça pahalı kalmaktadır. Sanal gerçeklik teknolojisi, daha büyük kitlelerin erişimi için düşük maliyetli giyilebilir çözümler hedefiyle hızla gelişmeye devam etmektedir. Örneğin, Samsung Gear VR veya Google Cardboard gibi akıllı telefon tabanlı sanal gerçeklik HMD'leri, üst segment seçeneklerden daha erişilebilir maliyettedir. Google Cardboard, günümüzde mevcut olan çoğu akıllı telefonla çalışabilen son derece düşük maliyetli (yaklaşık 10\$) bir HMD'dir. Ancak, çoğu akıllı telefonlarda oluşturulan deneyimler veya simülasyonlar, çevreleme açısından üst segment sanal gerçeklik HMD'leri ile oluşturulanlar kadar yüksek performanslı fotogerçekçilik sunmamaktadır. Ek olarak, akıllı telefon tabanlı çözümler sınırlı etkileşim yetenekleri sağlar. Bununla birlikte, erişilebilirlik ve fiyat arasındaki denge, akıllı telefon tabanlı çözümlerin daha geniş kitleler tarafından kullanılmasında kilit faktör olabilir. Kaldı ki, çoğu eğitim simülasyonları için, yüksek fotogerçekçilikten ziyade içerik kalitesi önceliklidir. Bu durum, alt segmentlerdeki HMD'leri kullanarak sınıftaki tüm öğrenciler için çok daha düşük maliyetle sanal gerçeklik teknolojilerinden yararlanabilmeyi hayli tercih edilebilecek bir alternatif haline getirir.

Sanal gerçekliğin eğitimde kullanılması faydalı olsa da risklerden yoksun değildir. Ana sorunlardan biri mevcuttaki esneklik eksikliğidir. Geleneksel derslerde öğrenciler istedikleri gibi soru sorabilir, cevap alabilir ve tartışmaya katılabilirler. Belirli bir yazılım çerçevesinde sanal gerçeklik başlığı kullanan öğrenciler, yazılımın getirdiği limitlere uymak durumundadır ve yazılımın tasarım fonksiyonlarıyla sunulanlardan başka şeyler yapamazlar. Bazı eğitimciler, doğal olarak değişime karşı dirençlidir ve onların da dahiliyet ve aktif katılım sağlaması, yeni teknolojilerin eğitim sistemine başarılı bir şekilde tanıtılması için önemlidir. Diğer bazı eğitimciler ise, tam tersine, teknolojik gelişmelere aşırı güvenme eğiliminde olabilir ve bu da öğretmen-öğrenci etkileşiminde eksikliklere yol açabilir. Programlanmış sanal bir öğretmenin aksine, canlı bir öğretmen, öğrenciler tarafından edinilen bilgilerin doğal bir filtresi ve moderatördür; varlığı, elde edilen verilerin geçerliliğini ve uygunluğunu değerlendirmek için gereklidir. Tüm eski usul yöntemleri modern dijital çözümlerle değiştirmek cazip gelse de son teknoloji çözümler ile insan etkileşimi, mentörlük ve öğretmen-öğrenci ilişkisi arasında bir denge gözetilmelidir.

Sanal gerçeklikteki ilerlemeler kuşkusuz sağlık hizmetlerini de dönüştürmektedir. Bu dönüşüm, doktorlar, bilimsel araştırmacılar, hastalar, yazılım şirketleri ve donanım üreticilerinin iştirakleri sayesinde mümkün olmaktadır. Teknik, bilişsellik, ölçeklenebilirlik ve benimseme eksenlerindeki zorluklar, daha proaktif ve kişiselleştirilmiş sağlık hizmetleri için sektöre özel çözümlere dair daha fazla inovasyonu teşvik etmektedir. Sanal gerçeklik, hastanelerin

dijitalleşmesine yönelik dünya çapındaki çabaları destekleyen yeni veri entegrasyon yetenekleri getirmekte ve gelişmiş tıbbi eğitim, iyileştirilmiş hasta deneyimi, merkezi uzmanlığın dağıtımı ve modern tıbbi prosedürler dahil olmak üzere benzersiz faydalar sağlamaktadır. Çevreyici teknolojilerde aşama kaydedildikçe ve buna paralel olarak, tamamlayıcı teknoloji platformları geliştikçe, bu alanların bir araya geleceği ve sağlık hizmetlerinin sunulma biçiminde sismik değişimler yaratacağından şüphe yoktur. Geleceğin hastanesinde, aynı zamanda yapay zeka, robotik cerrahi ve kişiselleştirilmiş implantların entegre tıbbi kullanımının doktorlar ve hastalarla birlikte yerinde gerçekleştiği görülebilecektir. Sanal gerçeklikteki gelişmeler ve genişletilmiş gerçeklik (ing. extended reality) spektrumundaki diğer teknolojiler, tamamlayıcı doğaları itibarıyla daha da ikna edici hale gelerek başka platform teknolojilerini yeni erişilebilirlik, satın alınabilirlik ve etkinlik seviyelerine yükseltecek; sonuçta olumlu ekonomik etki, eğitim ve beceri artışı sağlayacak ve tüm dünyadaki hastalar için yaşam kalitesini artıracaktır [68].

Geçmişte tıp eğitimi, kadavralar, maketler ve nihayetinde gözetim altında gerçek hastalar üzerinde yapılıyordu. Günümüzde tıp eğitiminin, tıbbi simülasyonlarda sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik ile uygulanmasına ve bunların staj müfredatında yer edinmesine yönelik bir dönüşüm devam etmektedir. Fiziksel rehabilitasyon, engellilik idamesi, cerrahi eğitim, bilişsel rahatsızlıkların tedavisi ve analjezik modalite dahil olmak üzere tıp alanının çeşitli dallarında ve unsurlarında, geniş bir yelpazede gerçekleştirilen sanal gerçeklik uygulamalarında önemli faydalar elde edildiği raporlanmıştır [115]–[120]. Sanal gerçekliğe geçişin devam eden başarısı, büyük ölçüde simülasyon ve etkileşimin aslına uygunluğundaki ilerlemeye bağlı olacaktır. Ayrıca, uygulamaya özel standartlaştırılmış cerrahi simülasyon değerlendirme ölçütlerine ihtiyaç vardır. Zira güvenilir ölçütler, farklı simülasyonlar arasında daha adil bir karşılaştırmanın yanı sıra hedeflenen uygulama ile ilgili gerçekten önemli olan yönleri odaklanmayı mümkün kılacaktır [121].

Diğer bir zorluk, gerçek cerrahi aletlerinin verdiği hissi taklit etme amacıyla faydalanılan haptik geri bildirim cihazlarının kullanımında yatmaktadır. Haptik geribildirim, tıbbi simülasyonlarda sanal gerçeklik deneyiminin aslına uygunluğunu artırmak için önem taşır. Haptik güncelleme sıklığının getirdiği hesaplama gereksinimleri, gerçek zamanlı görsellerinkinden bile daha zorlayıcıdır. Gerçekçi kuvvet geri bildirim için çarpışma algılama ve kuvvet oluşturma bir milisaniyeden daha kısa sürede çözülmesi gerekir. İnsan vücudu yumuşak ve sert doku kombinasyonundan var olduğu için, cerrahi simülasyonun sert-sert ve sert-yumuşak nesne etkileşimini taklit edebilmesi gerekir. Sert-sert nesne etkileşimi, gerçekleştirmesi en kolay olanıdır ve çoğu cerrahi simülasyonda uygulanmaktadır. Ancak simülasyonun aslına uygunluğunu artırmak için, gerektiğinde sert-yumuşak nesne etkileşiminin de mevcut olmasına ihtiyaç vardır. Rijit (deforme olmayan) nesnelere arası etkileşimde kabul edilebilir sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, rijit ve deforme olabilen nesnelere arasındaki etkileşim, veri yapılarının bir milisaniyelik zaman sınırı içinde güncellenmesini ve doğru fiziksel davranışı taklit etmesini gerektirir. Literatürde bu konuda umut verici sonuçlara ulaşılmıştır [122]. Bugün, geniş

bir uygulama yelpazesini hedefleyen, ticari olarak temin edilebilen birçok haptik geri bildirim cihazı bulunmaktadır. Fakat, genel kullanım hedefiyle üretilen bu cihazların fiziksel uç işlevleri (son efektörleri) operasyonlar sırasında kullanılan tıbbi aletlere benzemez. Bu sorunla başa çıkmak için, haptik geri besleme cihazının uç işlevleri gerçek bir cerrahi aletle değiştirilebilir [123]. Ancak bu durumda cihazın sağladığı çalışma alanı, kuvvet aralığı, çözünürlük ve sertlik değişmeyecektir. Bu bakımdan, uygulamaya özel haptik geri bildirim cihazları geliştirilmesi daha iyi bir çözüm olacaktır. Elbette, yüksek kaliteli haptik geri bildirim cihazları pahalıdır ve cerrahi simülasyonların maliyetini büyük ölçüde artırır [124].

COVID-19 pandemisi, normal yaşamımızı dramatik şekillerde değiştirmiştir. Yüz yüze grup etkinliklerine erişimin ani ve neredeyse tamamen kaybıyla birlikte okullarda uzaktan eğitime; sağlık hizmetlerinde yüz yüze doktor ziyaretlerinden uzaktan teletıp görüşmelerine geçiş, bilhassa gelişmiş ülkelerde, hızlı ve geniş bir ölçekte gerçekleşebilmiştir [125][126]. Neredeyse her büyüklükteki profesyonel toplantılar sırasında sanal olarak buluşma ve etkili bir şekilde etkileşime girmek için gerekli teknolojilerin uzun zamandır geliştiriliyor olması ve hemen benimsenebilmeleri için yaygın olarak mevcutta bulunmaları bunu mümkün kılmıştır. Örneğin, 2020’de yapılan bir anket, yanıt veren eğitim programlarının %97’sinin cerrahi eğitiminde kapsamlı sanal konferansları benimsediğini ortaya koymuştur [127]. Bununla birlikte, uygulamalı eğitim olanaklarının kaybı ve stajyerlerin fiziksel ve duygusal esenliğine yönelik karmaşık güçlükler de dahil olmak üzere diğer zorluklar karşısında mevcut teknolojilerin yaygın oluşu tek başına kolay bir geçişi garanti etmemiştir [95].

Artık tüm tıp ve eğitim toplulukları COVID-19’a uyum sağlamak zorunda kaldığına göre, mevcut halk sağlığı krizi geçtikten sonra bile sanal eğitim için pek çok alanda gerçekten geniş kapsamlı etkiler görülebilecektir. Öte yandan, bu uygulamaların ne kadar uzun süreli olacağı konusunda çok fazla spekülasyon da yapılmıştır. Sanal eğitim uygulamalarına ilişkin yakın tarihli bir çok-kurumlu görüş bildirgesinde [128], coğrafi sınırlamalar olmaksızın geniş kapsamlı toplantılara erişim imkanının katılım için nasıl eşit görülmemiş fırsatlar yarattığına dair dengeli bir tablo olduğu ortaya koymuştur. Buna karşın, sanal görüşmelerde gerçek hayatta alıştığımız ve beklediğimiz her türlü etkileşimin mümkün olmamasından ötürü işbirliği veya mentörlüğü olumsuz etkileyebilecek yönler de mevcuttur. Sanal etkileşimlerin gelecekte sunacağı imkanların, geçmişten gelen uygulamaları ne yönde değiştireceğini ve nihayetinde pandemi sonrası dünyada ne denli değerli ve tamamlayıcı olacağını göreceğiz.

Kaynaklar

- [1] W. R. Sherman and A. B. Craig, “Understanding virtual reality,” *San Francisco, CA: Morgan Kaufman*, 2018.
- [2] J. Kim and T. Leathem, “Virtual reality as a standard in the construction management curriculum,” Dec. 2018.
- [3] J. Orlosky, K. Kiyokawa, and H. Takemura, “Virtual and augmented reality on the 5g highway,” *Journal*

- of *Information Processing*, vol. 25, pp. 133–141, 2017.
- [4] J. Jerald, *The VR book: Human-centered design for virtual reality*. Morgan & Claypool, 2015.
- [5] M. Slater, “Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, no. 1535, pp. 3549–3557, 2009.
- [6] S. Bouchard and A. “. Rizzo, “Applications of virtual reality in clinical psychology and clinical cognitive neuroscience—an introduction,” in *Virtual Reality for Psychological and Neurocognitive Interventions*, A. “. Rizzo and S. Bouchard, Eds. New York, NY: Springer New York, 2019, pp. 1–13, isbn: 978-1-4939-94823. doi: 10.1007/978-1-4939-9482-3_1. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-94823_1.
- [7] D. Villani, F. Riva, and G. Riva, “New technologies for relaxation: The role of presence.,” *International Journal of Stress Management*, vol. 14, no. 3, p. 260, 2007.
- [8] J. Fox, J. Bailenson, and J. Binney, “Virtual experiences, physical behaviors: The effect of presence on imitation of an eating avatar,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 18, no. 4, pp. 294–303, 2009.
- [9] S. Persky and J. Blascovich, “Immersive virtual video game play and presence: Influences on aggressive feelings and behavior,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 17, no. 1, pp. 57–72, 2008.
- [10] M. Price and P. Anderson, “The role of presence in virtual reality exposure therapy,” *Journal of anxiety disorders*, vol. 21, no. 5, pp. 742–751, 2007.
- [11] C. Heeter, “Being there: The subjective experience of presence,” *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, vol. 1, no. 2, pp. 262–271, 1992.
- [12] S. Zheng, M. B. Rosson, P. C. Shih, and J. M. Carroll, “Understanding student motivation, behaviors and perceptions in moocs,” in *Proceedings of the 18th ACM conference on computer supported cooperative work & social computing*, 2015, pp. 1882–1895.
- [13] R. E. Yager, “A vision for what science education should be like for the first 25 years of a new millennium,” *School Science and Mathematics*, vol. 100, no. 6, pp. 327–341, 2000.
- [14] A. Collins and R. Halverson, *Rethinking education in the age of technology: The digital revolution and schooling in America*. Teachers College Press, 2018.
- [15] I. Lazar and I. O. Panisoara, “Understanding the role of modern technologies in education: A scoping review protocol,” *Psychreg J. Psychol*, vol. 2, pp. 74–86, 2018.
- [16] M. Lieshout, T. Egyedi, and W. Bijker, *Social Learning Technologies: The introduction of multimedia in education*. Routledge, 2018.
- [17] C. Goldin and L. F. Katz, “The race between education and technology,” in *Inequality in the 21st Century*, Routledge, 2018, pp. 49–54.
- [18] H. Hōrak, “Computer vision-based unobtrusive physical activity monitoring in school by room-level physical activity estimation: A method proposition,” *Information*, vol. 10, no. 9, p. 269, 2019.
- [19] D. Kamińska, T. Sapiński, S. Wiak, ve diğerleri, “Virtual reality and its applications in education: Survey,” *Information*, vol. 10, no. 10, p. 318, 2019.
- [20] G. Cvetkovski, L. Petkovska, P. Di Barba, ve diğerleri, “Vimela project: An innovative concept for teaching mechatronics using virtual reality,” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 95, no. 5, pp. 18–21, 2019.
- [21] S. Minocha, *Google expeditions and lesson plans*, Dec. 2016. [Online]. Available: <https://www.shaileyminocha.info/news/2016/10/23/google-expeditions-and-lesson-plans>
- [22] A. Brown and T. Green, “Virtual reality: Low-cost tools and resources for the classroom,” *TechTrends*, vol. 60, no. 5, pp. 517–519, 2016.
- [23] C. Blyth, “Immersive technologies and language learning,” *Foreign Language Annals*, vol. 51, no. 1, pp. 225–232, 2018.
- [24] J. A. di Lanzo, A. Valentine, F. Sohel, A. Y. T. Yapp, K. C. Muparadzi, and M. Abdelmalek, “A review of the uses of virtual reality in engineering education,” *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 28, no. 3, pp. 748–763, 2020, issn: 1099-0542. doi: 10.1002/cae.22243.
- [25] T. Nadan, V. Alexandrov, R. Jamieson, and K. Watson, “Is virtual reality a memorable experience in an educational context?” *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*, vol. 6, no. 1, pp. 53–57, 2011.
- [26] Y. Slavova and M. Mu, “A comparative study of the learning outcomes and experience of vr in education,” in *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, IEEE, 2018, pp. 685–686.
- [27] T. Cochrane, “Mobile vr in education: From the fringe to the mainstream,” *International Journal of Mobile and Blended Learning (IJMBL)*, vol. 8, no. 4, pp. 44–60, 2016.
- [28] B. Salah, M. H. Abidi, S. H. Mian, M. Krid, H. Alkhalefah, and A. Abdo, “Virtual reality-based engineering education to enhance manufacturing sustainability in industry 4.0,” *Sustainability*, vol. 11, no. 5, p. 1477, 2019.
- [29] M. Akçayır and G. Akçayır, “Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature,” *Educational Research Review*, vol. 20, pp. 1–11, 2017.
- [30] L. Jensen and F. Konradsen, “A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training,” *Education and Information Technologies*, vol. 23, no. 4, pp. 1515–1529, 2018.
- [31] F. Wang and M. J. Hannafin, “Design-based research and technology-enhanced learning environments,” *Educational technology research and development*, vol. 53, no. 4, pp. 5–23, 2005.

- [32] H. Macleod and C. Sinclair, "Digital learning and the changing role of the teacher," in *Encyclopedia of Educational Philosophy and Theory*, Springer Singapore, 2015, pp. 1–5.
- [33] Z. Tacgin, *Virtual and Augmented Reality: An Educational Handbook*. Cambridge Scholars Publishing, 2020.
- [34] L. Lenz, A. Richert, K. Schuster, and S. Jeschke, "Are virtual learning environments appropriate for dyscalculic students? a theoretical approach on design optimization of virtual worlds used in mixed-reality simulators," in *2015 IEEE Games Entertainment Media Conference (GEM)*, IEEE, 2015, pp. 1–8.
- [35] B. Dalgarno and M. J. Lee, "What are the learning affordances of 3-d virtual environments?" *British Journal of Educational Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 10–32, 2010.
- [36] C. Dede, "Immersive interfaces for engagement and learning," *science*, vol. 323, no. 5910, pp. 66–69, 2009.
- [37] A. Karabulut-Ilgu, N. Jaramillo Cherez, and C. T. Jahren, "A systematic review of research on the flipped learning method in engineering education," *British Journal of Educational Technology*, vol. 49, no. 3, pp. 398–411, 2018.
- [38] J. Garzón, J. Pavón, and S. Baldiris, "Systematic review and meta-analysis of augmented reality in educational settings," *Virtual Reality*, vol. 23, no. 4, pp. 447–459, 2019.
- [39] T. Wang and D. Towey, "A mobile virtual environment game approach for improving student learning performance in integrated science classes in hong kong international schools," in *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE)*, IEEE, 2013, pp. 386–388.
- [40] Y. Iidal, D. Tsutsumi, S. Saeki, Y. Ootsuka, T. Hashimoto, and R. Horie, "The effect of immersive head mounted display on a brain computer interface game," in *Advances in Affective and Pleasurable Design*, Springer, 2017, pp. 211–219.
- [41] C. Christou, "Virtual reality in education," in *Affective, interactive and cognitive methods for e-learning design: creating an optimal education experience*, IGI Global, 2010, pp. 228–243.
- [42] W. Alhalabi, "Virtual reality systems enhance students' achievements in engineering education," *Behaviour & Information Technology*, vol. 35, no. 11, pp. 919–925, 2016.
- [43] W. Huang, "Evaluating the effectiveness of headmounted display virtual reality (hmd vr) environment on students' learning for a virtual collaborative engineering assembly task," in *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, IEEE, 2018, pp. 827–829.
- [44] L. Stuchlíková, A. Kósa, P. Benko, and P. Juhász, "Virtual reality vs. reality in engineering education," in *2017 15th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*, IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [45] A. Parkinson, R. Kitchen, A.-D. Tudor, S. Minocha, and S. Tilling, "Role of smartphone-driven virtual reality field trips in inquiry-based learning," 2017.
- [46] M. N. Saadatzi, R. C. Pennington, K. C. Welch, and J. H. Graham, "Small-group technology-assisted instruction: Virtual teacher and robot peer for individuals with autism spectrum disorder," *Journal of autism and developmental disorders*, vol. 48, no. 11, pp. 3816–3830, 2018.
- [47] O. T. Laseinde, S. B. Adejuyigbe, K. Mpofo, and H. M. Campbell, "Educating tomorrows engineers: Reinforcing engineering concepts through virtual reality (vr) teaching aid," in *2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, IEEE, 2015, pp. 1485–1489.
- [48] E. Tanner, S. Savadatti, B. Manning, and K. Johnsen, "Usability and cognitive benefits of a mobile tracked display in virtual laboratories for engineering education," in *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, IEEE, 2016, pp. 269–270.
- [49] M. Melatti and K. Johnsen, "Virtual reality mediated instruction and learning," in *2017 IEEE Virtual Reality Workshop on K-12 Embodied Learning through Virtual & Augmented Reality (KELVAR)*, IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [50] I. Makarova, R. Khabibullin, E. Belyaev, and A. Bogateeva, "The application of virtual reality technologies in engineering education for the automotive industry," in *2015 International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL)*, IEEE, 2015, pp. 536–544.
- [51] M. T. Valdez, C. M. Ferreira, M. J. M. Martins, and F. M. Barbosa, "3d virtual reality experiments to promote electrical engineering education," in *2015 International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET)*, IEEE, 2015, pp. 1–4.
- [52] A. C. M. Queiroz, A. M. Nascimento, R. Tori, and M. I. da Silva Leme, "Using hmd-based immersive virtual environments in primary/k-12 education," in *International Conference on Immersive Learning*, Springer, 2018, pp. 160–173.
- [53] D. Parmar, "Evaluating the effects of immersive embodied interaction on cognition in virtual reality," Ph.D. dissertation, Clemson University, 2017.
- [54] N. R. Herga, B. Čagran, and D. Dinevski, "Virtual laboratory in the role of dynamic visualisation for better understanding of chemistry in primary school," *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, vol. 12, no. 3, pp. 593–608, 2016.
- [55] D. Bogusevschi, C. Muntean, and G.-M. Muntean, "Teaching and learning physics using 3d virtual learning environment: A case study of combined virtual reality and virtual laboratory in secondary school," *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, vol. 39, no. 1, pp. 5–18, 2020.
- [56] P. Migkotzidis, D. Ververidis, E. Anastasovitis, ve diğçerleri, "Enhanced virtual learning spaces using applied gaming," in *International Conference on*

- Interactive Collaborative Learning*, Springer, 2018, pp. 710–721.
- [57] M. Wrzesien and M. A. Raya, “Learning in serious virtual worlds: Evaluation of learning effectiveness and appeal to students in the e-junior project,” *Computers & Education*, vol. 55, no. 1, pp. 178–187, 2010.
- [58] *About*, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://vrschoolresearch.com/about/>.
- [59] E. Olmos-Raya, J. Ferreira-Cavalcanti, M. Contero, M. C. Castellanos, I. A. C. Giglioli, and M. Alcañiz, “Mobile virtual reality as an educational platform: A pilot study on the impact of immersion and positive emotion induction in the learning process,” *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, vol. 14, no. 6, pp. 2045–2057, 2018.
- [60] Ü. Çakiroğlu and S. Gökoğlu, “Development of fire safety behavioral skills via virtual reality,” *Computers & Education*, vol. 133, pp. 56–68, 2019.
- [61] M. T. Schultheis and A. A. Rizzo, “The application of virtual reality technology in rehabilitation,” *Rehabilitation psychology*, vol. 46, no. 3, p. 296, 2001.
- [62] H. H. Ip, S. W. Wong, D. F. Chan, ve diğerleri, “Enhance emotional and social adaptation skills for children with autism spectrum disorder: A virtual reality enabled approach,” *Computers & Education*, vol. 117, pp. 1–15, 2018.
- [63] G. Lorenzo, A. Lledó, J. Pomares, and R. Roig, “Design and application of an immersive virtual reality system to enhance emotional skills for children with autism spectrum disorders,” *Computers & Education*, vol. 98, pp. 192–205, 2016.
- [64] P. Arter, T. Brown, M. Law, J. Barna, A. Fruehan, and R. Fidiham, “Virtual reality: Improving interviewing skills in individuals with autism spectrum disorder,” in *Society for Information Technology & Teacher Education International Conference*, Association for the Advancement of Computing in Education (AACE), 2018, pp. 1086–1088.
- [65] S. L. Burke, T. Bresnahan, T. Li, ve diğerleri, “Using virtual interactive training agents (vita) with adults with autism and other developmental disabilities,” *Journal of autism and developmental disorders*, vol. 48, no. 3, pp. 905–912, 2018.
- [66] M. Lombard and T. Ditton, “At the heart of it all: The concept of presence,” *Journal of computer-mediated communication*, vol. 3, no. 2, JCMC321, 1997.
- [67] W. Greenleaf, “How vr technology will transform healthcare,” in *ACM SIGGRAPH 2016 VR Village*, 2016, pp. 1–2.
- [68] M. R. Desselle, R. A. Brown, A. R. James, M. J. Midwinter, S. K. Powell, and M. A. Woodruff, “Augmented and virtual reality in surgery,” *Computing in Science & Engineering*, vol. 22, no. 3, pp. 18–26, 2020.
- [69] J. Dascal, M. Reid, W. W. IsHak, ve diğerleri, “Virtual reality and medical inpatients: A systematic review of randomized, controlled trials,” *Innovations in clinical neuroscience*, vol. 14, no. 1-2, p. 14, 2017.
- [70] D. Van Krevelen and R. Poelman, “A survey of augmented reality technologies, applications and limitations,” *International journal of virtual reality*, vol. 9, no. 2, pp. 1–20, 2010.
- [71] R. M. Satava, “Historical review of surgical simulation—a personal perspective,” *World journal of surgery*, vol. 32, no. 2, pp. 141–148, 2008.
- [72] S. L. Delp, J. P. Loan, M. G. Hoy, F. E. Zajac, E. L. Topp, and J. M. Rosen, “An interactive graphics-based model of the lower extremity to study orthopaedic surgical procedures,” *IEEE Transactions on Biomedical engineering*, vol. 37, no. 8, pp. 757–767, 1990.
- [73] R. M. Satava and H. H. Sherk, “Virtual reality surgical simulator—the first steps,” *Clinical Orthopaedics and Related Research*, no. 442, pp. 2–4, 2006.
- [74] M. Alaker, G. R. Wynn, and T. Arulampalam, “Virtual reality training in laparoscopic surgery: A systematic review & meta-analysis,” *International Journal of Surgery*, vol. 29, pp. 85–94, 2016.
- [75] N. E. Seymour, “Vr to or: A review of the evidence that virtual reality simulation improves operating room performance,” *World journal of surgery*, vol. 32, no. 2, pp. 182–188, 2008.
- [76] S. S. Y. Tan and S. K. Sarker, “Simulation in surgery: A review,” *Scottish medical journal*, vol. 56, no. 2, pp. 104–109, 2011.
- [77] K. Makiyama, H. Yamanaka, D. Ueno, ve diğerleri, “Validation of a patient-specific simulator for laparoscopic renal surgery,” *International Journal of Urology*, vol. 22, no. 6, pp. 572–576, 2015.
- [78] K. Endo, N. Sata, Y. Ishiguro, ve diğerleri, “A patient-specific surgical simulator using preoperative imaging data: An interactive simulator using a three-dimensional tactile mouse,” *Journal of Computational Surgery*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2014.
- [79] J. Eschweiler, J.-P. Stromps, M. Fischer, ve diğerleri, “Development of a biomechanical model of the wrist joint for patient-specific model guided surgical therapy planning: Part 1,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 230, no. 4, pp. 310–325, 2016.
- [80] I. Badash, K. Burt, C. A. Solorzano, and J. N. Carey, “Innovations in surgery simulation: A review of past, current and future techniques,” *Annals of Translational Medicine*, vol. 4, no. 23, pp. 453–453, Dec. 2016, issn: 23055839, 23055847. doi: 10.21037/atm.2016.12.24.
- [81] J. E. Callan, M. M. Maheu, and S. F. Bucky, “Crisis in the behavioral health classroom: Enhancing knowledge, skills, and attitudes in telehealth training,” in *Career paths in telemental health*, Springer, 2017, pp. 63–80.
- [82] C. Moro, Z. Štromberga, A. Raikos, and A. Stirling, “The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences and medical anatomy,”

- Anatomical sciences education*, vol. 10, no. 6, pp. 549–559, 2017.
- [83] R. Mason, “Computer conferencing for managers.,” *Interactive Learning International*, vol. 8, no. 1, pp. 15–28, 1992.
- [84] C. Basdogan, S. De, J. Kim, M. Muniyandi, H. Kim, and M. A. Srinivasan, “Haptics in minimally invasive surgical simulation and training,” *IEEE computer graphics and applications*, vol. 24, no. 2, pp. 56–64, 2004.
- [85] C. Basdogan, M. Sedef, M. Harders, and S. Wesarg, “Vr-based simulators for training in minimally invasive surgery,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 27, no. 2, pp. 54–66, 2007.
- [86] K. Dockx, E. M. Bekkers, V. Van den Bergh, ve diğerleri, “Virtual reality for rehabilitation in parkinson’s disease,” *Cochrane Database of Systematic Reviews*, no. 12, 2016.
- [87] K. Gurusamy, R. Aggarwal, L. Palanivelu, and B. Davidson, “Systematic review of randomized controlled trials on the effectiveness of virtual reality training for laparoscopic surgery,” *Journal of British Surgery*, vol. 95, no. 9, pp. 1088–1097, 2008.
- [88] S. Barry Issenberg, W. C. Mcgaghie, E. R. Petrusa, D. Lee Gordon, and R. J. Scalese, “Features and uses of high-fidelity medical simulations that lead to effective learning: A beme systematic review,” *Medical teacher*, vol. 27, no. 1, pp. 10–28, 2005.
- [89] Z. Nedic, J. Machotka, and A. Nafalski, *Remote laboratories versus virtual and real laboratories*. IEEE, 2003, vol. 1.
- [90] P. Piromchai, A. Avery, M. Laopaiboon, G. Kennedy, and S. O’Leary, “Virtual reality training for improving the skills needed for performing surgery of the ear, nose or throat,” *Cochrane Database of Systematic Reviews*, no. 9, 2015.
- [91] J. Rosen, B. Hannaford, C. G. Richards, and M. N. Sinanan, “Markov modeling of minimally invasive surgery based on tool/tissue interaction and force/torque signatures for evaluating surgical skills,” *IEEE transactions on Biomedical Engineering*, vol. 48, no. 5, pp. 579–591, 2001.
- [92] A. G. Gallagher, E. M. Ritter, H. Champion, ve diğerleri, “Virtual reality simulation for the operating room: Proficiency-based training as a paradigm shift in surgical skills training,” *Annals of surgery*, vol. 241, no. 2, p. 364, 2005.
- [93] R. Khan, J. Plahouras, B. C. Johnston, M. A. Scaffidi, S. C. Grover, and C. M. Walsh, “Virtual reality simulation training for health professions trainees in gastrointestinal endoscopy,” *Cochrane Database of Systematic Reviews*, no. 8, 2018.
- [94] R. K. Reznick and H. MacRae, “Teaching surgical skills—changes in the wind,” *New England Journal of Medicine*, vol. 355, no. 25, pp. 2664–2669, 2006.
- [95] J. Beqari and N. E. Seymour, “Application of technology to educational needs in surgery,” *Journal of Surgical Oncology*, vol. 124, no. 2, pp. 181–192, 2021.
- [96] S. Dargar, R. Kennedy, W. Lai, V. Arikatla, and S. De, “Towards immersive virtual reality (ivr): A route to surgical expertise,” *Journal of computational surgery*, vol. 2, no. 1, pp. 1–26, 2015.
- [97] K. A. Ericsson, R. T. Krampe, and C. Tesch-Römer, “The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance.,” *Psychological review*, vol. 100, no. 3, p. 363, 1993.
- [98] G. D. Logan, “Automaticity, resources, and memory: Theoretical controversies and practical implications,” *Human factors*, vol. 30, no. 5, pp. 583–598, 1988.
- [99] J. Rasmussen, “Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models,” *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, no. 3, pp. 257–266, 1983.
- [100] D. M. Hilty, K. Randhawa, M. M. Maheu, ve diğerleri, “A Review of Telepresence, Virtual Reality, and Augmented Reality Applied to Clinical Care,” *Journal of Technology in Behavioral Science*, vol. 5, no. 2, pp. 178–205, Jun. 2020, issn: 2366-5963. doi: 10 . 1007/s41347-020-00126-x.
- [101] F. Wang, Y. Liu, M. Tian, Y. Zhang, S. Zhang, and J. Chen, “Application of a 3d haptic virtual reality simulation system for dental crown preparation training,” in *2016 8th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME)*, IEEE, 2016, pp. 424–427.
- [102] S. F. Alfalah, J. F. Falah, T. Alfalah, M. Elfalah, N. Muhaidat, and O. Falah, “A comparative study between a virtual reality heart anatomy system and traditional medical teaching modalities,” *Virtual Reality*, vol. 23, no. 3, pp. 229–234, 2019.
- [103] A. Vankipuram, P. Khanal, A. Ashby, ve diğerleri, “Design and development of a virtual reality simulator for advanced cardiac life support training,” *IEEE journal of biomedical and health informatics*, vol. 18, no. 4, pp. 1478–1484, 2013.
- [104] B. Harrison, R. Oehmen, A. Robertson, ve diğerleri, “Through the eye of the master: The use of virtual reality in the teaching of surgical hand preparation,” in *2017 IEEE 5th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*, IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [105] M. Radia, M. Arunakiranthan, and D. Sibley, “A guide to eyes: Ophthalmic simulators,” *The Bulletin of the Royal College of Surgeons of England*, vol. 100, no. 4, pp. 169–171, 2018.
- [106] K. Isgin-Atici, A. Ozkan, U. Celikkan, ve diğerleri, “Usability study of a novel tool: The virtual cafeteria in nutrition education,” *Journal of Nutrition Education and Behavior*, vol. 52, no. 11, pp. 1058–1065, 2020.
- [107] Statista, *Virtual reality interest in the u.s. by age group 2015*, Jun. 2015. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/456812/virtual-reality-interestin-the-united-states-by-age-group/>.
- [108] S. Greengard, *Virtual Reality*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2019, pp. 148–149.

- [109] P. J. Costello ve diğerleri, "Health and safety issues associated with virtual reality: A review of current literature," 1997.
- [110] B. Cebeci, U. Celikcan, and T. K. Capin, "A comprehensive study of the affective and physiological responses induced by dynamic virtual reality environments," *Computer Animation and Virtual Worlds*, vol. 30, no. 3-4, e1893, 2019.
- [111] C. Regan, "An investigation into nausea and other side-effects of head-coupled immersive virtual reality," *Virtual Reality*, vol. 1, no. 1, pp. 17–31, 1995.
- [112] E. Avan, T. K. Capin, H. Gurcay, and U. Celikcan, "Enhancing vr experience with rbf interpolation based dynamic tuning of stereoscopic rendering," *Computers & Graphics*, 2021.
- [113] J. Radianti, T. A. Majchrzak, J. Fromm, and I. Wohlgenannt, "A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda," *Computers & Education*, vol. 147, p. 103778, Apr. 2020, issn: 03601315. doi: 10.1016/j.compedu.2019.103778.
- [114] J. Q. Coburn, I. Freeman, and J. L. Salmon, "A review of the capabilities of current low-cost virtual reality technology and its potential to enhance the design process," *Journal of computing and Information Science in Engineering*, vol. 17, no. 3, 2017.
- [115] A. Baldominos, Y. Saez, and C. G. del Pozo, "An approach to physical rehabilitation using state-of-the-art virtual reality and motion tracking technologies," *Procedia Computer Science*, vol. 64, pp. 10–16, 2015.
- [116] J. P. Bliss, H. S. Hanner-Bailey, and M. W. Scerbo, "Determining the efficacy of an immersive trainer for arthroscopy skills," *Studies in health technology and informatics*, vol. 111, pp. 54–56, 2005.
- [117] M.-D. Tsai, M.-S. Hsieh, and C.-H. Tsai, "Bone drilling haptic interaction for orthopedic surgical simulator," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 37, no. 12, pp. 1709–1718, 2007.
- [118] K. Sato, S. Fukumori, T. Matsusaki, ve diğerleri, "Nonimmersive virtual reality mirror visual feedback therapy and its application for the treatment of complex regional pain syndrome: An open-label pilot study," *Pain medicine*, vol. 11, no. 4, pp. 622–629, 2010.
- [119] K. Meyerbröker and P. M. Emmelkamp, "Virtual reality exposure therapy for anxiety disorders: The state of the art," *Advanced Computational Intelligence Paradigms in Healthcare 6. Virtual Reality in Psychotherapy, Rehabilitation, and Assessment*, pp. 47– 62, 2011.
- [120] C.-Y. Shing, C.-P. Fung, T.-Y. Chuang, I.-W. Penn, and J.-L. Doong, "The study of auditory and haptic signals in a virtual reality-based hand rehabilitation system," *Robotica*, vol. 21, no. 2, pp. 211–218, 2003.
- [121] L. Li, F. Yu, D. Shi, ve diğerleri, "Application of virtual reality technology in clinical medicine," *American Journal of Translational Research*, vol. 9, no. 9, pp. 3867–3880, Sep. 2017, issn: 1943-8141.
- [122] S. P. Byeon and D. Y. Lee, "Method for real-time simulation of haptic interaction with deformable objects using gpu-based parallel computing and homogeneous hexahedral elements," *Computational Mechanics*, pp. 1–14, 2020.
- [123] Y. Tai, L. Wei, M. Xiao, ve diğerleri, "A highimmersive medical training platform using direct intraoperative data," *IEEE access*, vol. 6, pp. 69438– 69452, 2018.
- [124] A. J. Lungu, W. Swinkels, L. Claesen, P. Tu, J. Egger, and X. Chen, "A review on the applications of virtual reality, augmented reality and mixed reality in surgical simulation: An extension to different kinds of surgery," *Expert Review of Medical Devices*, vol. 18, no. 1, pp. 47–62, Jan. 2021, issn: 1743-4440, 17452422. doi: 10.1080/17434440.2021.1860750.
- [125] E. Monaghesh and A. Hajizadeh, "The role of telehealth during covid-19 outbreak: A systematic review based on current evidence," *BMC Public Health*, vol. 20, no. 1, pp. 1–9, 2020.
- [126] R. E. Jones and K. R. Abdelfattah, "Virtual interviews in the era of covid-19: A primer for applicants," *Journal of surgical education*, vol. 77, no. 4, pp. 733– 734, 2020.
- [127] E. C. Ellison, K. Spanknebel, S. C. Stain, ve diğerleri, "Impact of the covid-19 pandemic on surgical training and learner well-being: Report of a survey of general surgery and other surgical specialty educators," *Journal of the American College of Surgeons*, vol. 231, no. 6, pp. 613–626, 2020.
- [128] D. Vervoort, J. A. Dearani, V. A. Starnes, V. H. Thourani, and T. C. Nguyen, "Brave new world: Virtual conferencing and surgical education in the coronavirus disease 2019 era," *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, vol. 161, no. 3, pp. 748–752, 2021.
- [129] P. Milgram and F. Kishino, "A taxonomy of mixed reality visual displays," *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, vol. 77, no. 12, pp. 1321– 1329, 1994.
- [130] M. J. Schuemie, P. van der Straaten, M. Krijn, and C. A. van der Mast, "Research on Presence in Virtual Reality: A Survey," *CyberPsychology & Behavior*, vol. 4, no. 2, pp. 183–201, Apr. 2001, issn: 1094-9313, 1557-8364.



Design of a Three Phase Z-Source Inverter for Photovoltaic Systems

Gökhan PARLA^{1*}, Mehmet ÖZDEMİR²

¹ Firat University, Electrical-Electronics Engineering Department, gokhan.parla@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-1525-5108

² Firat University, Electrical-Electronics Engineering Department, mozdemir@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-1178-060X

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 April 2022
Received in revised form 2 June 2022
Accepted 15 June 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Photovoltaic power generation systems, inverters, Z-source inverter, simple boost pulse width modulation.

Doi: 10.24012/dumf.1100464

* Corresponding author

ABSTRACT

Due to the danger of extinction of fossil energy resources and their harmful effects on the environment, interest in renewable energy sources has increased today. Furthermore, the photovoltaic energy, which is among renewable energy sources, has started to gain importance day by day. Especially, grid-connected Photovoltaic (PV) power generation systems have begun to be installed and used widely. In the grid-connected power generation systems, variable environmental conditions cause the DC voltage obtained from the PV systems to vary continuously. In the applications where traditional inverters are used, additional DC/DC converters are required to obtain an output at the desired frequency and amplitude. On the other hand, Z-source inverters which are a new concept can perform this raising and lowering process without the need for any intermediate circuit elements, thanks to the impedance network in their structures. For this reason, in this paper, Z-source inverter is designed for the PV systems. Z-source inverter modeling with impedance network is realized by using a simple boost switching method, and the modulation index and duty cycle parameters are adjusted to increase the DC voltage applied to its input. It is observed from the simulation results that using of the Z-source inverter is proper and efficient in the PV power generation systems.

*CRITICAL: Photovoltaic Power Generation Systems, Inverters, Z-source Inverter, Simple Boost Pulse Width Modulation.

Introduction

In recently, studies and applications on PV systems have become widespread with the increasing importance of the renewable energy sources. The most important reasons of that are that PV systems can convert the solar energy directly into the electrical energy, prevent the environmental pollution and have simple structure and easy to implement. PV systems can be applied in two different ways as connected to the grid and independent from the grid which are respectively on-grid and off-grid systems. It can be designed as fixed and mobile systems as the location of the solar panel.

Z-Source Inverter (ZSI) which is newly proposed is a simple single-stage power conversion concept [1]. It can stabilize or boost the AC output voltage, which is not possible with conventional inverters. Thanks to ZSI, the input DC voltage can be increase and also reduce. This feature, which cannot be achieved with conventional voltage and current source inverters, can be realized with an impedance network placed between the power source and the inverter. The use of traditional inverters in PV system applications not only increases the cost, but also leads to low efficiency and increased the number of components. However, this is not the case with ZSIs. The fact that ZSIs have the ability to raise

and invert the voltage in only one step has revealed that they are more proper for using in the PV system applications.

The studies in the literature have been researched on the field of the ZSI. First of all is a design of a PV system with a single phase ZSI in [2]. Thanks to important advantages of the ZSI, a simple single-stage power conversion is realized. MPPT technique is utilized to reduce the shading problem of the solar light and the all system is designed by using MATLAB/Simulink simulation. By this method, power losses are decreased since less switching devices are used and the efficiency are increased. As a result, a less costly and more reliable system is obtained due to the lack of the bulky transformer. In [3], ZSI is presented for the single phase grid connected PV system. In this study, the circuit capacitors and inductors are calculated briefly. The performance of an example PV module is examined by using MATLAB/Simulink and the design parameters are validated by the simulations. Authors in [4] give a comparative study of different shoot through control schemes for ZSIs. The working of the ZSI is examined by using various control methods which are Simple Boost Control (SBC), Maximum Boost Control (MBC) and Constant Boost Control (CBC). The simulation of the ZSI is also realized by using these control methods in this paper. In [5], three phase ZSI is designed for the solar PV applications. Traditional inverters

which are voltage source inverter(VSI) and current source inverter(CSI) and ZSIs are compared in terms of the performance, advantages, and drawbacks. It is observed that ZSI proposing a new PWM scheme is more advantageous than traditional inverters. Thus, the efficiency is increased and size and cost are reduced by the proposed three-phase ZSI for the solar PV systems. [6] explains a single phase cascaded semi-ZSI for the PV applications. This inverter uses a nonlinear Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) to produce sinusoidal voltage at the output as a micro inverter. The designed system solves the shading problem of the PV systems due to the independent maximum power point tracking. Furthermore, Total Harmonic Distortion and DC current components at the output during DC-AC conversion are reduced by this study. Topologies and controls of Z-source matrix converter are researched in [7]. These topologies are called as direct and indirect. While nine switching mosfets are used in the direct Z-source matrix converter, eighteen switching mosfets are utilized in the indirect Z-source matrix converter. It is observed that indirect Z-source matrix converter provides superiority over the traditional matrix converter and allows buck and boost operation by reducing the number of switches to get high efficiency. 3- Φ Z-source PWM controlled solar PV inverter is designed for the generation of three-phase electrical power in [8]. The proposed topology occurs from the single stage. Therefore, reliability of the system is high due to the less component. The low PV voltage is increased and maximum power tracking is realized by the designed MPPT charge controller. This proposed ZSI also decreases line harmonic distortions and cost as compared to conventional multilevel inverter. The analysis of Z-source based multilevel inverter is examined by using Matlab/Simulink in [9]. The performances of the ZSI are compared with the other traditional inverter topologies. As a result, the increasing in the voltage and current are filtered by the capacitors and inductors of the ZSI. Authors in [10] propose a single stage ZSI topology which eliminates some drawbacks of the conventional inverters like being the less or more output AC voltage than the input DC voltage and the shoot through faulty by providing two switches of the same leg to be gated in the circuit. Since ZSI also eliminates the dead time in the circuit, distortion is reduced and reliability of the system increases. In this study, the performance of ZSI is examined about reducing THD by using Matlab/Simulink for different load situations and modulation indexes. It is observed from the simulation results that ZSI shows higher performance than conventional VSI and ZSI. In the paper [11] explains a single stage ZSI topology based on the duty ratio and modulation index. The simulation of a single-phase induction motor is realized by the control of the single phase ZSI. This inverter provides lower line harmonics and shoot-through duty cycle. Therefore, it increases the reliability and efficiency and also extends the output AC voltage range of the inverter. [12] presents a ZSI concept which can also be used to DC-DC, AC-DC and AC-AC power conversions. A different impedance circuit is used to combine the source and power circuit. By a simple boost control method, Matlab/Simulink simulation and analysis of the ZSI are carried out in this study. The triggering pulses for six switches of the three phase ZSI are applied in the

simulations. The simulation results show that the desired load sinusoidal voltage and current are obtained by the filtered ZSI compared to the traditional inverters. In [13], a topology of two level ZSI is explained. Two level ZSI receives the power supply from the PV. Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) is used to control the switches of the ZSI for the shoot through and non-shoot through operation modes. This inverter provides high efficiency, low cost, and low leakage current for the PV systems. Simulation and design of the single phase ZSI are given in [14, 15]. ZSI eliminates the limitations of the traditional VSI and CSI and presents a novel power conversion concept. By using SBC PWM technique, the simulation of ZSI is realized for various modulation indexes. As a result, it is observed that the sinusoidal load voltage and current can be obtained by the filtered ZSI compared to the conventional inverters.

When examining the studies in the literature, it is observed that there are not many works on the ZSI gaining importance in the recent years. This structure provides significant advantages unlike the conventional inverters for the PV systems. Therefore, the ZSI is modeled and designed by using a simple boost switching method. According to the change of the modulation index and duty cycle parameters, the DC voltage applied to its input is increased. It is obtained from the simulation results that the ZSI is efficient and convenient for the PV power generation systems.

In the organization of the paper, the topology and analysis of the ZSI are firstly explained in Section 2. Then, Matlab/Simulink simulation of three phase ZSI is carried out in Section 3. The phase voltage, line voltage, and load current are analyzed for different modulation indexes and pulse width values. In order to reveal the difference of the ZSI from the VSI, the performances are compared with each other at the same operating conditions. In Section 4, the simulation results of the ZSI are given in detail. In the last Section, the conclusions are presented.

Z-Source Inverter

Topology

Three phase ZSI topology includes R-L output filter and loads as illustrated in Fig. 1.

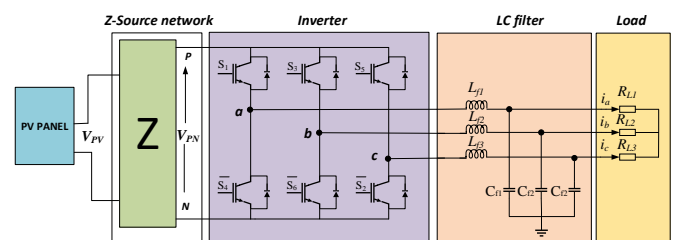


Figure 1. The topology of the three-phase ZSI

Analysis of the Z-Source Inverter Circuit

The equivalent circuit of the ZSI is shown in Fig. 2. In this structure, there is a single type of impedance circuit consisting of two capacitors and two inductors connected in an X-shape. This structure allows the main circuit to be transferred to the load, power supply or other converter. In

this way, the circuit structure of traditional inverters using capacitors and inductors turns into a unique new circuit structure. In this circuit, when the inductances L_1 and L_2 and capacitances C_1 and C_2 are the same values, the Z source network becomes symmetrical.

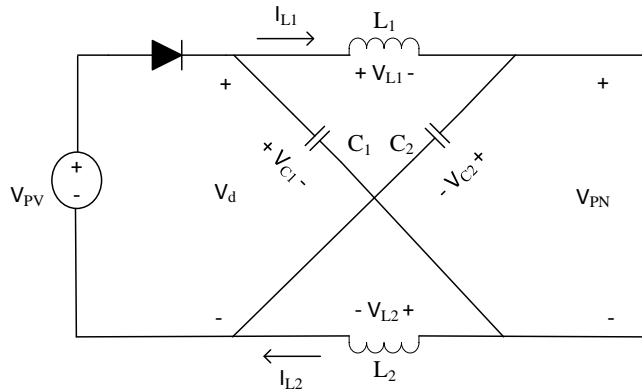


Figure 2. Equivalent circuit of the ZSI

As seen from the Fig. 2, the voltages can be written as follows

$$V_{C1} = V_{C2} = V_C \quad (1)$$

$$v_{L1} = v_{L2} = v_L \quad (2)$$

In the non-shoot-through situation (T_0), the Z-source circuit is shown by a constant current source in the Fig. 3.

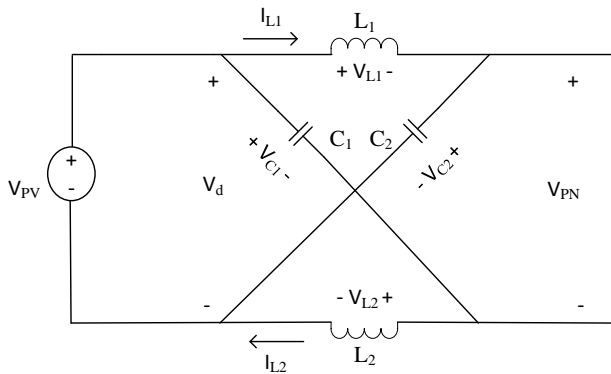


Figure 3. Equivalent circuit of the ZSI with non-shoot through state

According to the Fig. 3, the voltages in the circuit are given by

$$v_L = V_{PV} - V_C \quad (3)$$

$$v_d = V_{PV} \quad (4)$$

$$v_{PN} = V_C - v_L = 2V_C - V_{PV} \quad (5)$$

where v_L , V_{PV} , V_{PN} , and v_d are the inductor voltage, the input DC voltage, DC-link voltage, and diode voltage, respectively.

In the shoot-through situation (T_1), the Z-source circuit is shown by a short-circuit in the Fig. 4.

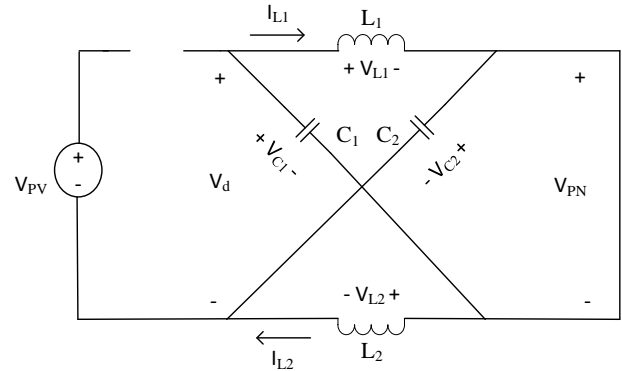


Figure 4. Equivalent circuit of the ZSI when the inverter is in the shoot through state

As seen from the Fig. 4, the voltages are calculated by using Kirchhoff's voltage law as follows

$$v_L = V_C \quad (6)$$

$$v_d = 2V_C \quad (7)$$

$$v_{PN} = 0 \quad (8)$$

The average voltage of the inductors over one switching period ($T=T_0+T_1$) should be zero in steady-state Equation (3-8).

$$V_C = \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_{PV} \quad (9)$$

The average and peak values of the DC voltage on the inverter circuit can be given as follows respectively.

$$v_{PN} = \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_{PV} = V_C \quad (10)$$

$$\hat{v}_{PN} = V_C - v_L = 2V_C - V_{PV} = \frac{T}{T_1 - T_0} V_{PV} = BV_{PV} \quad (11)$$

where B is the boost factor.

The Simulation of Three Phase ZSI

The modeling of three phase ZSI is realized by using Matlab/Simulink under sample working conditions as shown in Fig. 5.

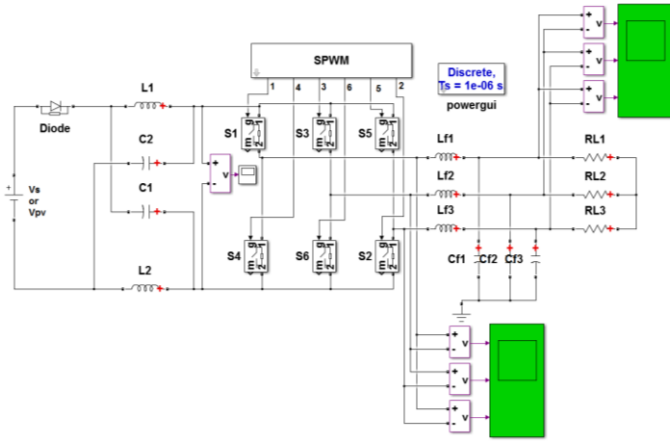


Figure 5. Matlab/Simulink model of the three-phase ZSI

In the model, the ZSI circuit consists of six main switches. The series connected diode in the three-phase ZSI model is utilized to prevent the reverse current. Transition signals for the switches are produced by the simple amplification pulse amplitude modulation technique as given in Fig. 6.

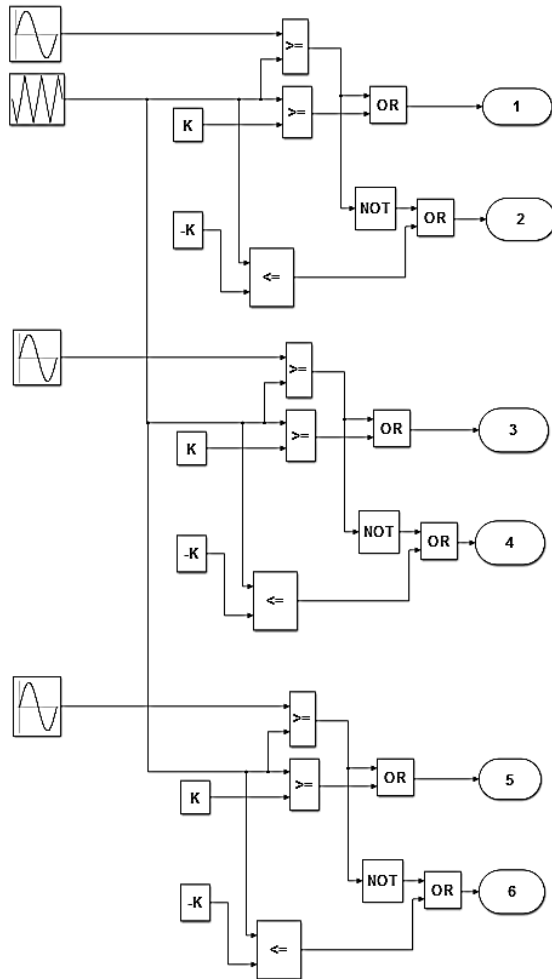


Figure 6. Simulation model of the SPWM switching signals for the three-phase ZSI

The transition signals applied to the switches of the ZSI are given in Fig. 7. In the simulation, the modulation index (M) used to generate the switching signals is 0.642 and the switching frequency is set to $f_s=10$ kHz.

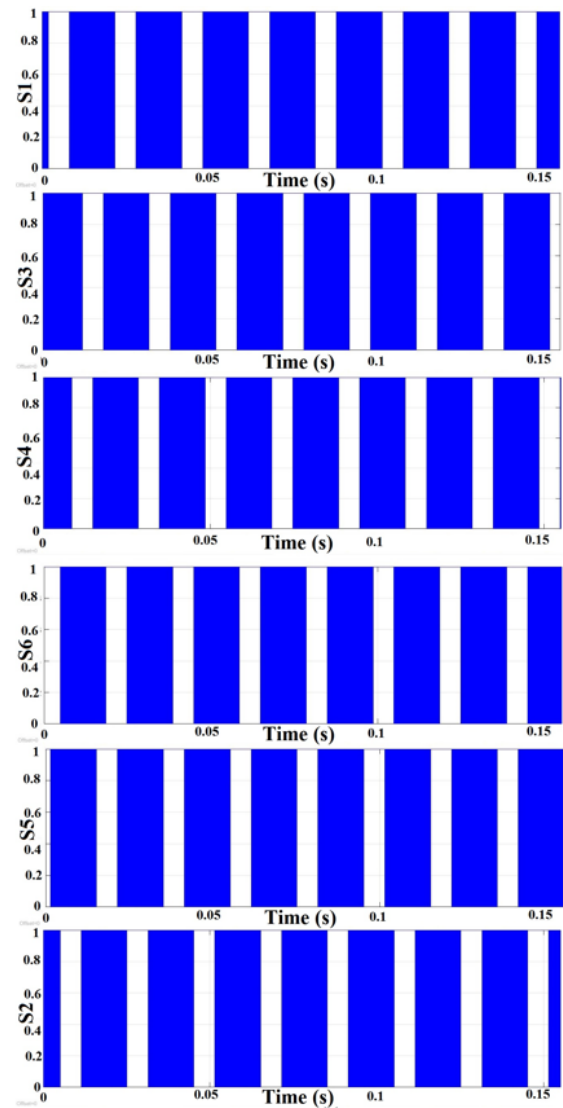


Figure 7. Simulink results of the three-phase simple boost control method of the switching signals

The parameters of the ZSI used in the simulation are shown in Table 1.

Table 1. The system parameters used in the ZSI.

Parameters	Value
Modulation Index	0.642
Duty Cycle (T_0/T)	0.358
Photovoltaic DC Input Voltage (V_{pv})	150 V
Fundamental Frequency	50 Hz
Switching Frequency (f_s)	10 kHz
Load Resistance ($R_{L1}=R_{L2}=R_{L3}$)	3.8 ohm
Z-source network inductance ($L_1=L_2$)	160 μ H
Z-source network capacitor ($C_1=C_2$)	1000 μ F
Output filter inductance ($L_{f1}=L_{f2}=L_{f3}$)	15 mH
Output filter capacitor ($C_{f1}=C_{f2}=C_{f3}$)	470 μ F

The Simulation Results of Three Phase ZSI

In this section, Matlab/Simulink simulation results of three phase ZSI are given in detail. Firstly, the phase-to-phase output voltage of the ZSI is shown in Fig. 8.

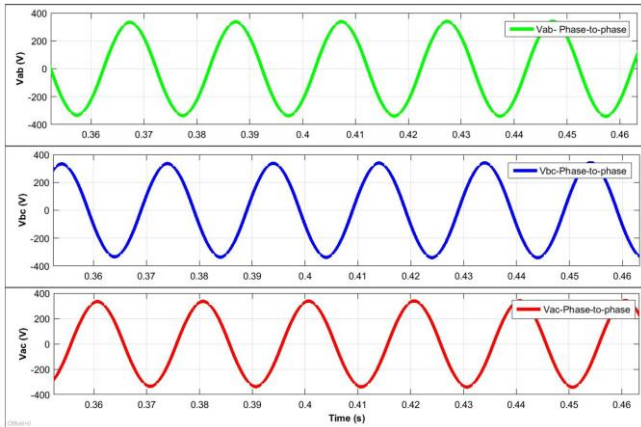


Figure 8. Phase-to-phase output voltage waveforms of the modeled ZSI

The phase-neutral voltages of the inverter output are also illustrated in Fig. 9.

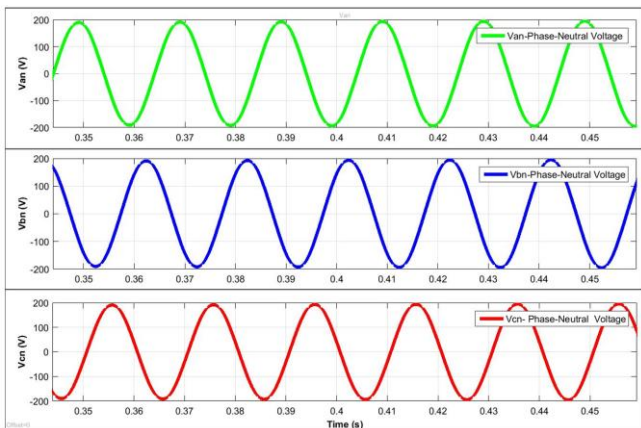


Figure 9. Phase-neutral output voltage waveforms of the modeled ZSI

The phase voltage and harmonic spectrum belonging to the unfiltered and filtered outputs of the model realized for the modulation index which is $M=0.642$ and $D_0=0.348$ are respectively shown in Fig. 10 and Fig. 11, respectively.

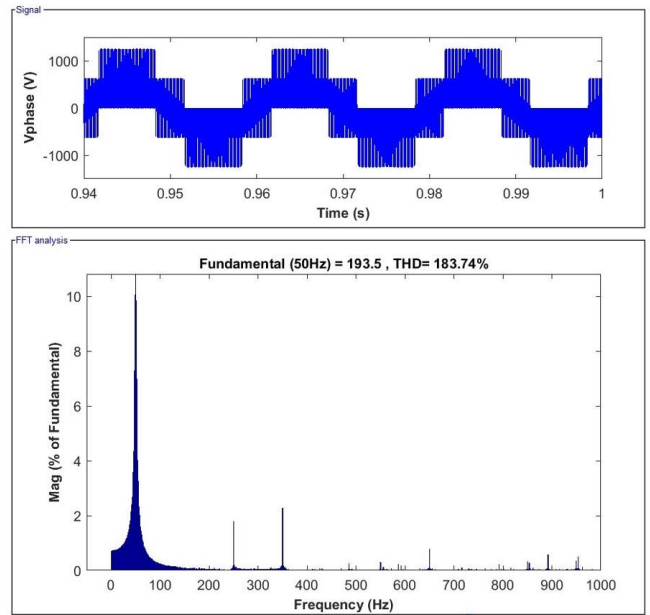


Figure 10. Phase voltage and harmonic spectrum of unfiltered output ($M=0.642$ and $T_0/T=0.358$)

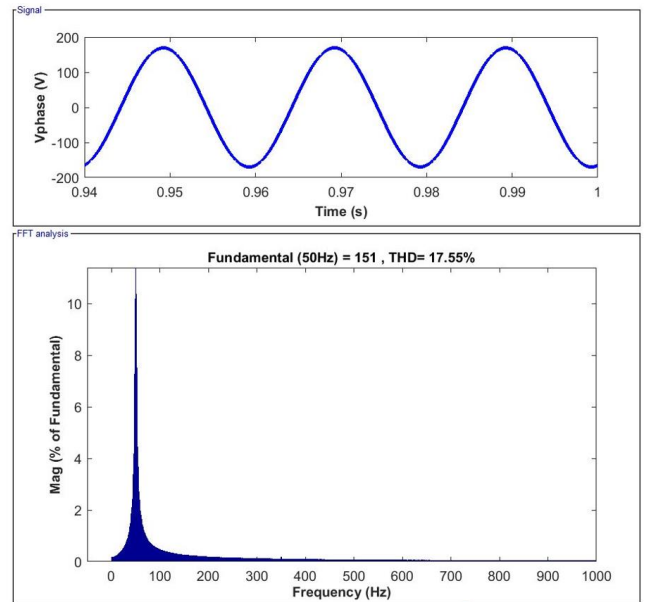


Figure 11. Phase voltage and harmonic spectrum of filtered output ($M=0.642$ and $T_0/T=0.358$)

The line voltage and harmonic spectrum belonging to the unfiltered and filtered outputs of the model realized for the modulation index which is $M=0.642$ and $D_0=0.348$ are respectively shown in Fig. 12 and Fig. 13, respectively.

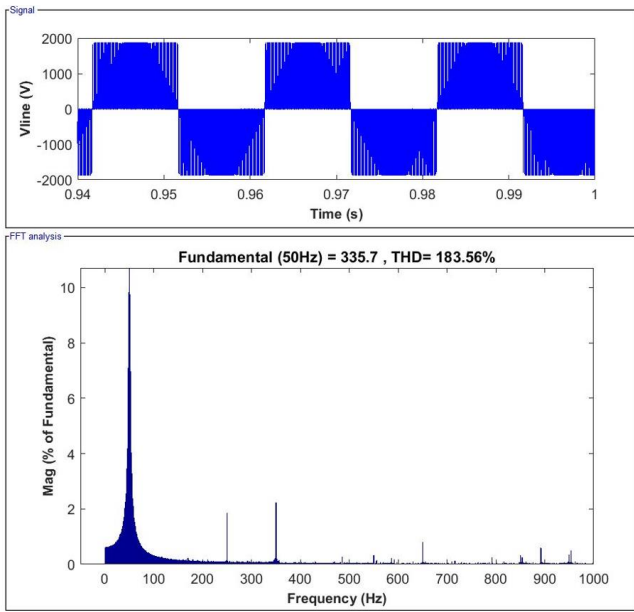


Figure 12. Line voltage and harmonic spectrum of unfiltered output ($M=0.642$ and $T_0/T=0.358$)

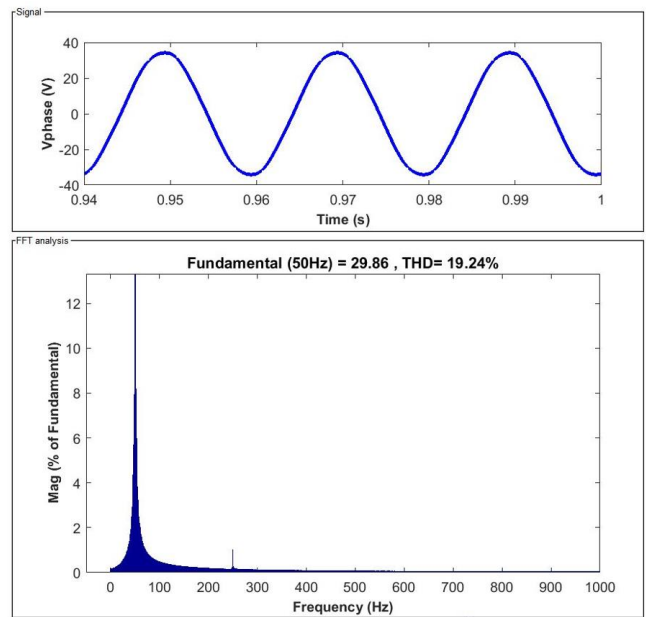


Figure 14. Phase voltage and harmonic spectrum of filtered output ($M=0.9$ and $T_0/T=0.1$)

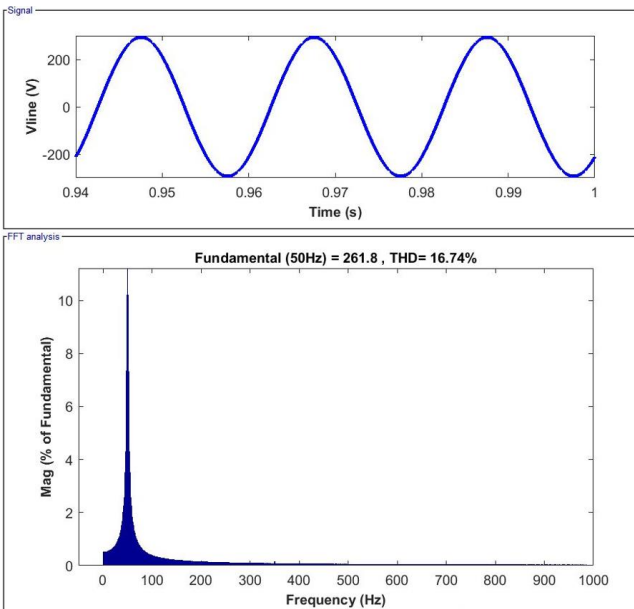


Figure 13. Line voltage and harmonic spectrum of filtered output ($M=0.642$ and $T_0/T=0.358$)

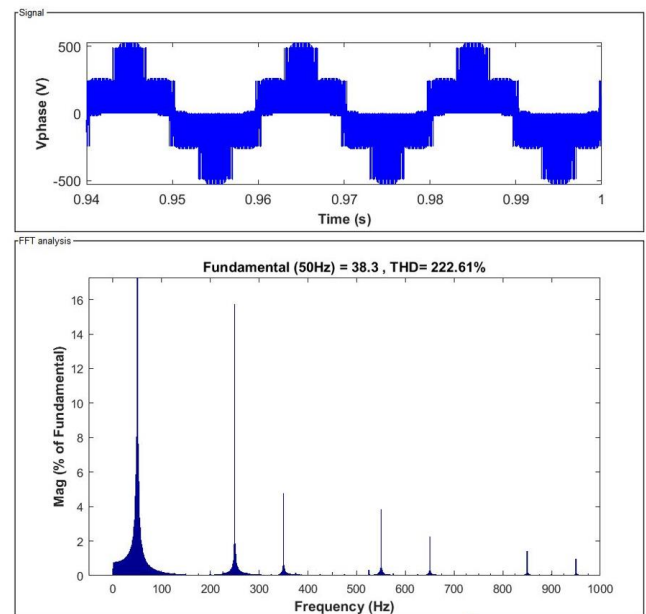


Figure 15. Phase voltage and harmonic spectrum of unfiltered output ($M=0.9$ and $T_0/T=0.1$)

After that, the phase voltage and harmonic spectrum belonging to the filtered and unfiltered outputs of the model realized for the modulation index which is $M=0.9$ and $T_0/T=0.1$ are respectively shown in Fig. 14 and Fig. 15, respectively.

The phase current and harmonic spectrum belonging to the filtered output of the model realized for the modulation index which is $M=0.9$ and $T_0/T=0.1$ are shown in Fig. 16.

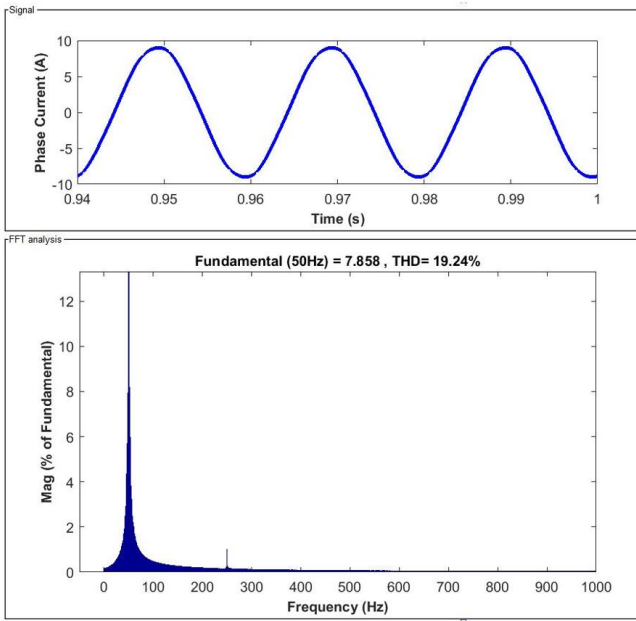


Figure 16. Phase current and harmonic spectrum of filtered output ($M=0.9$ and $T_0/T=0.1$)

The line voltage and harmonic spectrum belonging to the unfiltered and filtered outputs of the model realized for the modulation index which is $M=0.9$ and $T_0/T=0.1$ are respectively shown in Fig. 17 and Fig. 18, respectively.

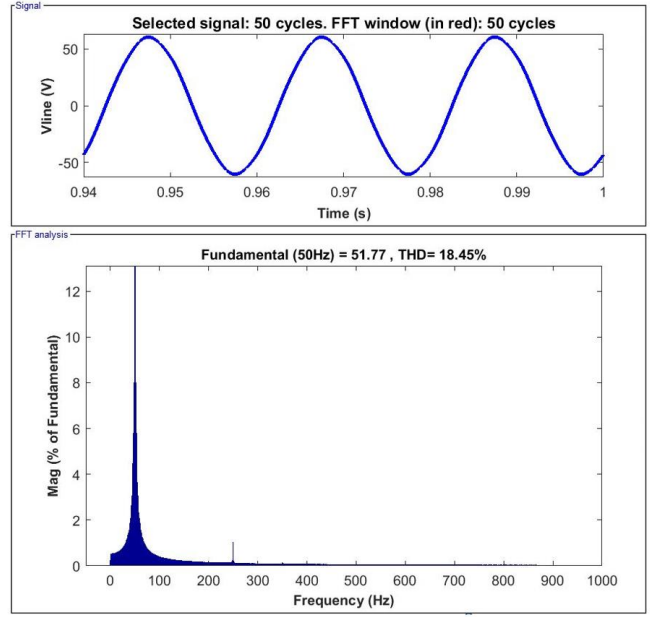


Figure 18. Line voltage and harmonic spectrum of filtered output ($M=0.9$ and $T_0/T=0.1$)

The effective values of the filtered phase voltage, line voltage and phase current for different pulse width values (T_0/T) and the total harmonic distortion percentages at these voltage values are given in Table 2, provided that the impedance network parameters in the circuit and the switching frequency and modulation index remain the same.

Table 2. Phase voltage, line voltage, phase current, and total harmonic distortion values of the filtered output for the fixed M and variable T_0/T values.

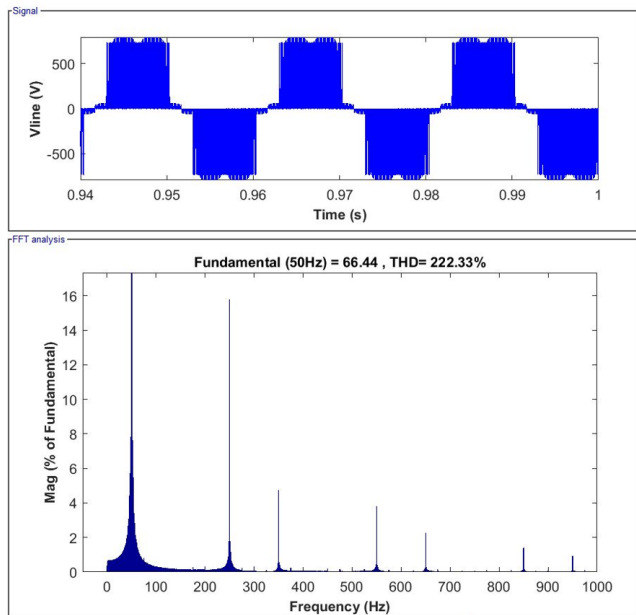


Figure 17. Line voltage and harmonic spectrum of unfiltered output ($M=0.9$ and $T_0/T=0.1$)

Pulse Width	V_{Phase}/THD	V_{Line}/THD	I_{Phase}/THD
0.1	22.7	39.32	5.974
0.2	19.66%	18.87%	19.66%
0.3	53.53	90.99	13.82
0.4	18.63%	17.83%	18.63%
0.45	93.38	161.7	24.57
0.46	17.94%	17.13%	17.94%
0.47	139.7	242	36.76
0.49	17.28%	16.46%	17.28%
0.499	163.1	282.5	42.92
0.6	16.96%	16.14%	19.96%
0.7	167.7	290.5	44.13
0.8	16.90%	16.08%	16.90%
0.9	172.3	298.4	45.34
	16.83%	16.01%	16.83%
	182.2	315.7	47.96
	16.68%	15.86%	16.68%
	190.7	330.4	50.2
	16.59%	15.77%	16.59%
	131.2	226.7	34.53
	4.65%	4.07%	4.65%
	65.59	113.7	17.26
	4.00%	3.12%	4.00%
	46.41	80.34	12.21
	4.00%	2.74%	4.00%
	31.17	53.9	8.2
	3.98%	2.86%	3.98%

When the output values in the Table 2 are examined, it is observed that the output phase and line voltages of the ZSI increase for the pulse width which is in the range of 0.1-0.499. On the other hand, it is obtained that the output phase and line voltages of the ZSI decrease in the range which the pulse width is 0.5-0.9. These results show that the ZSI works as an amplifier for the pulse width values less than 0.5 and as a reducer for the pulse width values greater than 0.5.

The effective values of the output phase voltage, line voltage, phase current, and harmonic spectrum values belonging to different modulation indexes for the pulse width range which is less than 0.5 in the boost mode operation of the ZSI are given in Table 3.

Table 3. Phase voltage, line voltage and total harmonic distortion values of the filtered output for different modulation index values when the pulse width value is in the boost mode.

Pulse Width	M	V _{Phase} /THD	V _{Line} /THD	I _{Phase} /THD
0.1	1	24.99	43.29	6.577
		19.08%	18.29%	19.08%
	0.9	24.39	42.24	6.418
		19.24%	18.45%	19.24%
	0.642	22.7	39.32	5.974
		19.66%	18.87%	19.66%
	0.55	22.02	38.15	5.796
		19.84%	19.04%	19.84%
	0.4	20.77	35.97	5.465
		20.15%	19.36%	20.15%
0.45	1	160.8	278.5	42.32
		16.25%	15.43%	16.25%
	0.9	162.4	281.3	42.73
		16.42%	15.60%	16.42%
	0.642	163.1	282.5	42.92
		16.96%	16.14%	16.96%
	0.55	157.7	273.1	41.49
		17.08%	16.26%	17.08%
	0.4	126.4	219	33.27
		17.16%	16.35%	17.16%

As the values in Table 3 are handled, it is seen that the output voltage is highest when the pulse width is close to 0.5 and the modulation index is greater than 0.5. As a result, according to different modulation indexes and pulse widths, the simulation results show that ZSIs make it possible to obtain the desired voltage level by simply changing the inverter gain without the need to change the DC voltage value applied to its inputs.

The effective values of the output phase voltage, line voltage, phase current, and harmonic spectrum of the ZSI and VSI are compared with each other for the same modulation indexes and different pulse width ranges in the Table 4.

Table 4. Comparison of the performance results of the ZSI and VSI for M=0.8 and R=5 ohm, L=8 mH.

Pulse Width=0.1						
f _s kHz	V _{Phase} /THD		V _{Line} /THD		I _{Phase} /THD	
	ZSI	VSI	ZSI	VSI	ZSI	VSI
5	43.48	24.16	75.25	41.87	7.769	4.318
	18.39%	3.30%	19.19%	1.84%	19.27%	4.86%
10	29.38	24.1	51.67	41.76	5.331	4.307
	18.14%	3.30%	19.20%	1.85%	19.28%	4.86%
15	25.56	24.2	44.26	41.91	4.567	4.324
	18.44%	3.30%	19.23%	1.85%	19.31%	4.86%
20	26.25	24.6	45.47	42.62	4.691	4.397
	18.20%	3.30%	18.99%	1.86%	19.08%	4.86%
Pulse Width=0.4						
5	329.7	33.56	571	58.15	58.92	5.997
	16.03%	3.30%	16.85%	1.86%	16.96%	4.86%
10	174.6	33.5	302.5	58.03	31.19	5.986
	16.03%	3.30%	16.85%	1.87%	16.97%	4.86%
15	122.9	33.59	212.9	58.18	21.96	6.003
	15.97%	3.30%	16.79%	1.88%	16.91%	4.86%
20	96.35	33.34	166.9	57.74	17.22	5.957
	16.01%	3.30%	16.82%	1.88%	16.94%	4.86%

According to the Table 4, the effective values of the phase voltage, line voltage and phase current vary significantly depending on the switching frequency and pulse width in the Z-Source Inverter. An increase is observed in the effective values of the phase and line voltages and phase current, especially at low switching frequency values for both step-down/boost operating states of the inverter. It is also seen that different switching frequencies and pulse width conditions do not have a great effect on these voltages and the phase current in the VSI inverter obtained by deactivating the impedance network in the modeled Z-Source inverter, and the VSI inverter continues to operate in step-down mode despite the change in the pulse width.

Conclusion

In this study, a three-phase ZSI, which is a new inverter application that eliminates the disadvantages of traditional inverters, is modeled in the simple boost switching mode by Matlab/Simulink and its suitability for the PV systems has been tried to be determined by monitoring the values of the output alternating voltage and load current at different operating parameters. In addition, comparison of the performances of the with VSI is realized at the same operating conditions and different frequencies to reveal the difference of the ZSI from traditional VSI. According to these comparisons, when the values in Table 2 obtained for the operating conditions of the constant M=0.642, f_s=10 kHz and variable T₀/T (pulse width) are examined, it is seen that the voltage value closest to the mains voltage is obtained when the pulse width is 0.499. Furthermore, it is observed that the effective value of the line voltage obtained from the inverter outputs under these operating conditions is 330.4 volts. Besides, Table 3 is examined for the constant f_s=10 kHz and different pulse width values (M=0.1 and M=0.45) in boost mode and operating states in different modulation index values. It is observed that the voltage value closest to

the mains voltage is obtained for the values of the pulse width and the modulation index which are 0.45 and 0.9, respectively and also, the effective value of the line voltage at the output of the inverter is 281.3 V under these operating conditions. Finally, some operating conditions which the modulation index of ZSI and VSI is fixed are compared for the different switching frequencies and pulse width values in the Table 4. According to the Table 4, the voltage value closest to the mains voltage is obtained for the values which are 5 kHz switching frequency, $M=0.8$, and $DG=0.4$. It is also observed that the effective value of the line voltage obtained from the inverter output under these operating conditions is 571 V. Accordingly, the ZSI which is designed and modeled for the $f_s=5$ kHz, $M=0.8$ and $DG=0.4$ operating conditions, increases the DC supply voltage of 150 volts applied to its input to the mains voltage without the need for any DC-DC amplifier. As a result in this study, the quantitative data show that the use of the ZSI in the PV power generation systems is the right choice compared to the conventional inverters. In existing PV power generation systems, the duration of sunshine varies at different times of the day. Therefore, the DC voltage obtained is also not constant. In order to convert the DC voltage produced in PV power generation systems to an AC with constant amplitude and frequency using a conventional inverter, a DC-DC amplifier converter must be added between the conventional inverter used and the output of the PV arrays. As seen from the Table 4, where ZSIs are compared with the VSIs, the desired voltage from the system output can be obtained by the ZSI without the need for any amplifier in between, by choosing the duty cycle parameters and appropriate switching frequencies. The fact that the gain of ZSIs can be adjusted to a value between zero and infinity makes these inverters attractive for the PV power generation systems where the value of the input DC voltage produced at certain times of the day is constantly changing. By the help of a control system to be designed, the changes in the environmental conditions can be determined and PV systems can be utilized at the maximum level by changing the duty cycle parameters of the ZSI according to these changes. Thus, the performance and efficiency obtained from PV systems can be increased in nowadays when the need for energy has been increasing day by day.

Conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared

References

- [1] F. Z. Peng, "Z-source inverter," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 39, no. 2, pp. 504-510, 2003.
- [2] R. R. Patil, S. P. Patil, S. D. Patil, and A. M. Mulla, "Designing of Z-source inverter for photovoltaic system using Matlab/Simulink," in *IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, April 2017, pp. 1-5.
- [3] N. Singh and S. K. Jain, "Single phase Z-source inverter for photovoltaic system," in *IEEE 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Nov. 2016, pp. 1-6.
- [4] M. A. Mawlikar and S. S. Nair, "A comparative analysis of shoot through control schemes for Z-source inverter," in *IEEE International Conference on Electrical, Instrumentation and Communication Engineering (ICEICE)*, April 2017, pp. 1-6.
- [5] N. Kshirsagar, P. D. Debre, A. Kadu, and R. Juneja, "Design of three phase Z-source inverter for solar photovoltaic application," in *IEEE International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIECS)*, March 2017, pp. 1-6.
- [6] M. A. Ismeil, M. Orabi, and M. Ahmed, "Single-phase cascaded semi-Z-source inverter for photovoltaic applications," in *IEEE International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, Feb. 2018, pp. 398-402.
- [7] T. Wahono, T. Sutikno, N. S. Widodo, and M. Facta, (2018, October). "A survey on topologies and controls of Z-Source matrix converter," in *IEEE 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, Oct. 2018, pp. 189-192.
- [8] S. N. A. Faruqui, N. Anwer, and B. Prasad, "3- Φ Z-source PWM controlled solar photovoltaic inverter," in *IEEE 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, April 2018, pp. 1-5.
- [9] P. Debre, A. D. Kadu, and D. R. Tutakne, "Analysis of Z source based multilevel inverter using Matlab," in *IEEE International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS)*, June 2018, pp. 281-285.
- [10] N. Muruganandham, G. Lavanya, and R. S. Babu, "Simulation of SPWM based Z-source inverter" in *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, vol. 6, no. 3, pp. 53-60, 2013.
- [11] A. V. Jaiswal, B. N. Nimje, A. N. Jaiswal, and M. S. Barapatre, "Simulation of impedance source inverter driven single phase induction motor" in *GRD Journal for Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 14-18, March 2016.
- [12] M. Praveen Kumar, M. Sushma, R. Santhosh Kumar, "Design and simulation of the three phase Z-source inverter," *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology (IJARIIT)*, vol. 5, no. 2, pp. 1399-1402.
- [13] R. Palanisamy, A. U. Mutawakkil, K. Selvakumar, and D. Karthikeyan, "Modelling and simulation of z source inverter based grid connected PV system," in *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, Dec. 2014, pp. 1-4.
- [14] P. H. Zope and A. Somkuwar, (2012). "Design and simulation of single phase Z-source inverter for utility interface," *International Journal of Electrical Engineering and Technology(IJEET)*, vol. 1, no. 1, pp. 127-143, June 2010.
- [15] M. Murali, P. Deshpande, B. Virpurwala, and P. Bhavsar, "Simulation and fabrication of single phase Z-source inverter for resistive load," *UPB Sci. Bull., Series C*, vol. 78, no. 1, pp. 112-124, 2016.



Detection of Object (Weapons) with Deep Learning Algorithms from Images Obtained by Unmanned Aerial Vehicles

Mustafa BURGAZ^{1*}, Cafer BUDAK²

¹PhD student of Department of Electronic-Communication Engineering Yıldız Technical University, mustafa.burgaz@std.yildiz.edu.tr

Orcid No:0000-0001-7525-2649

²Department of Electric-Electronic Engineering, Dicle University, cafer.budak@dicle.edu.tr Orcid No:0000-0002-8470-4579

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 May 2022
Received in revised form 22 June 2022
Accepted 24 June 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Deep learning, unmanned aerial vehicles, regional based convolutional neural networks, ResNet

Doi: 10.24012/dumf.1116534

* Corresponding author

ABSTRACT

Today, the rapid development of Artificial Intelligence technologies is effective in the success of deep learning algorithms in different application areas. These applications detect many objects that even the human eye cannot detect in object detection in videos and images with deep learning algorithms. In this study, it is aimed to detect weapons from images obtained from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) by using deep learning algorithms. Images were obtained from the UAV at 200 different angles and heights. Images from different angles and heights obtained from the unmanned aerial vehicle are trained by Regional Based Convolutional Neural Networks (R-CNN) and Residual Neural Network (ResNet). Two-thirds of the images we obtained were split into training images and one-third into test images. The feature maps extracted from the images used for training were compared with the test images. By bringing these compared images closer to the desired images, 99% of the desired image detection is achieved. Performance evaluation of the algorithms was made using Loss plot, mAP curves, Precision, Recall and F1-Score. The performance evaluation of the detected images is discussed, and the success of deep learning algorithms used in object detection is presented. The ResNet model showed higher performance with 64% accuracy, 94% recall and 76% F1 score.

Introduction

There has been rapid development in the field of artificial intelligence in recent years. The source of this development is seen as a result of the success of machine learning science in different application areas. Deep learning algorithms, which have started to be used widely in machine learning science, have opened the door to new technologies [1]. Deep learning algorithms play an important role in the design of the technologies produced for different purposes. Thanks to the algorithms used in deep learning, applications have been developed in many different areas. Increasing production in agriculture and rural development [2], reducing noise in the health and biomedical images [3], making images meaningful in the field of culture and art [4], analyzing crowd density in the field of security and arranging social areas, etc. areas are shown as examples of these applications. Deep learning also gives successful results in object detection with multiple algorithms. Object detection is a technologically challenging and practically useful problem. Object detection is concerned with the detection of various objects. Recognition of objects in images is one of the challenging problems in computer vision, especially when the number of objects is large. While humans can

recognize thousands of object types, most existing object recognition systems will only recognize a few [5]. Object detection is defined as bringing the region, which has a feature in its entirety, to the fore with different image processing methods. Therefore applications that are made by making use of features such as classification and comparison, which form the basis of object detection, are becoming widespread.

Among the deep learning algorithms that make these applications very fast and successful, Regional-Based Convolutional Neural Networks (R-CNN) are preferred in object detection.

R-CNN provides a transition in object detection in the image classification as simple as possible. Implementing and training R-CNNs has become valuable as it is straightforward and provides a unified solution for object detection and segmentation [6].

ResNet algorithm has been developed to improve its performance in R-CNN image classification. ResNets ILSVRC 2015 achieves state-of-the-art performance in its classification task and allows training deep networks of up to 1000 layers. Similar to road networks, it uses identity shortcut links that enable the flow of information without the attenuation caused by multiple stacked nonlinear transforms. Thus, remaining networks are transmitted as

input [7]. Faster R-CNN and ResNet algorithms detect the given images by considering possible locations.

In this study, it is aimed to make the images obtained from UAVs work in real-time with object detection algorithms.

Literature Review

There are many studies in the literature on object detection with UAV images [11]. Sought an automatic solution to the problem of detecting and counting cars on UAV images. They did not start by dividing the input image into small homogeneous regions that could be used as candidate locations for vehicle detection and then used deep learning architecture to adopt a highly descriptive feature from these windows by removing a window around each region. They used the trained neural network system in conjunction with the SVM classification to classify the regions as "automobile" and "car free". All regions with a bounding box greater than 200 in width or length were eliminated in advance, as the regions extracted in practice have variable dimensions, and considering that an average car known in the test images is about 200×90 pixels, it is pointless to examine regions larger than 200×200 pixels. For the regions within the size limitations, a 160×160 -pixel window is kept around each region and access to the CNN algorithm is provided for feature extraction. The sensitivity analysis experiment concluded that the 160×160 -pixel window size at an 80% level provided the best overall accuracy of 93.6% for 200×200 pixels.

A new UAV study focusing on complex scenarios, created 14 feature maps with approximately 80,000 representative frame bounding boxes selected from 10 hours of raw videos. They divided object detection into single object tracking and multiple object tracking. Later, they conducted a detailed quantitative study for each task using the latest technology algorithms. Experimental results show that the newest methods available perform relatively poorly in the dataset due to new challenges arising in real scenes based on UAVs, such as high density, small objects and camera movement [8].

Radovic et al. (2017) detailed the parameters used in CNN training in a series of aerial images for efficient and automatic object detection. They attributed the accuracy and reliability of CNNs to the training of the network and the selection of operational parameters and CNN [9].

They detailed the training procedure and parameter selection. They used a new dataset of 267 images containing 540 aircraft to test the CNN recognition accuracy. Object detection results showed that by choosing an appropriate parameter set, a CNN could detect and classify objects with high accuracy (97.5%) and computational efficiency. They showed that CNN was able to recognize "airplane" objects in the data set with 97.5% accuracy (526 out of 540 "aircraft" objects), only 16 samples were miscategorized (14 aircraft were not identified). An incorrectly categorized sample was an example where the image contained an airplane but was not recognized by the network. The tagged results calculated the positive predictive value for CNN as 99.6%, false discovery rate 0.4%, true positive rate 97.4% and false negative rate 2.6%.

Ye et al. (2018) presented a new approach to detection and tracking from a single camera mounted on a UAV with moving object detection and tracking algorithms in a video. Initially, they predicted background movements through a perspective transformation model. They then identified moving objects in the background extracted image through a deep learning classifier trained on manually tagged data sets. They found spatial-temporal properties for each candidate moving object through optical flow matching and then pruned according to their motion patterns compared to the background. They used Kalman Filter to increase the temporal consistency of detecting moving objects. The experimental results in the real video data set showed that the deep learning method could increase detection accuracy with the help of appearance information. The results showed that the algorithms could detect and monitor small UAVs with limited computing resources. They used multiple target UAVs with various views and shapes for the data set. They corrected 40 videos as a training set for deep learning to create a basic accuracy data set for training and performance evaluation. The deep learning method was fully utilized from the manually tagged training dataset with a classification accuracy of over 95% [10].

Method

The CNN algorithms (Faster R-CNN and ResNet) used in the study take into account the weights that will adversely affect training in order to train the images obtained with UAVs during the object detection phase. Pre-trained IMAGENET weights are used for ResNet and R-CNN. The block diagram of the system is shown in Fig. 1.

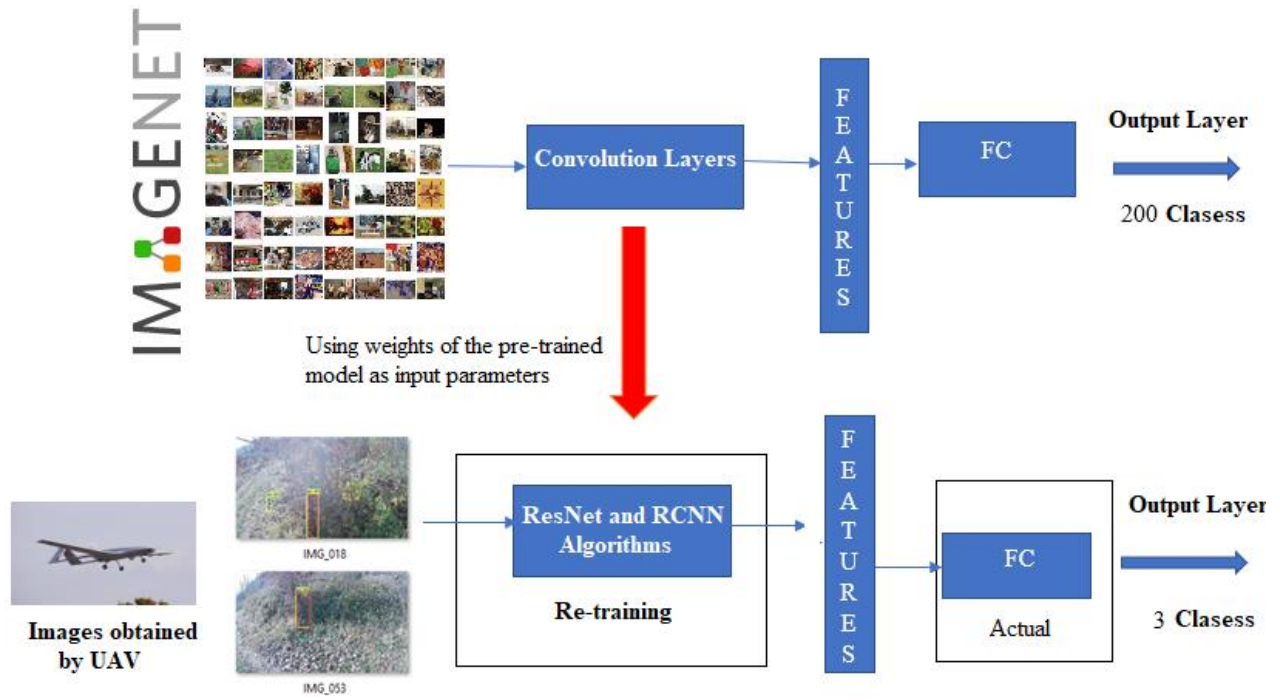


Figure 1. The block diagram of the system

In the block diagram in Fig. 2, R-CNN and ResNet models whose weights have been saved from the images taken with the UAV perform object detection.



Figure 2. Object detection process

R-CNN, a successful object detection algorithm, has derivatives such as Fast R-CNN, Faster R-CNN and Mask R-CNN. These deep learning algorithms are used in many deep learning libraries. TensorFlow library is one of them. TensorFlow is a software library developed by the Google Brain-Machine within Google's Machine Learning Intelligence research organization to conduct machine learning and deep neural network research [12].

In order to improve something in machine learning, it often needs to be measured. TensorBoard is used as an important tool to provide the measurements and visualizations required during machine learning's object detection. TensorBoard provides the function of tracking trial metrics such as loss and accuracy, visualizing the model plot, projecting nodes into a lower-dimensional area and much more [13].

Performance Evaluation

AP (Average sensitivity) is a popular metric used to measure object detection accuracy. AP calculates the AP value for the recall value from 0 to 1 [14]. While the average sensitivity continues to be used while measuring the accuracy of the object detection models, we can also measure the accuracy of the object detection models used by creating a bounding box.

It regroups many challenging tasks such as object detection, classification and regression tasks. During the object detection process, the models create many bounding boxes with different confidence values. The Intersection over Union (IoU) field is the overlapping area between the ground truth box and the predicted box. A higher IoU is a sign of a better-predicted bounding box position. Usually, all bounding box candidates are kept with an IoU area greater than or equal to some threshold value. True positive (TP), False positive (FP), and False negative (FN) are used in sensitivity and recall calculations to determine the performance of a model.

Table 1. Tables of Precision, Recall and F1-Score metrics [15]

Metric	Equation
Precision	$\frac{TP}{TP + FP}$
Recall	$\frac{TP}{TP + FN}$
F1-Score	$2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall}$

Detection boxes_Precision mAP graph is shown in Fig. 3. The scores in the mAP graph are related to capturing objects between 32² and 96² pixels. In the figure, The approximate value of the Faster R-CNN architecture is

0.38. This value indicates that it can detect small size objects.

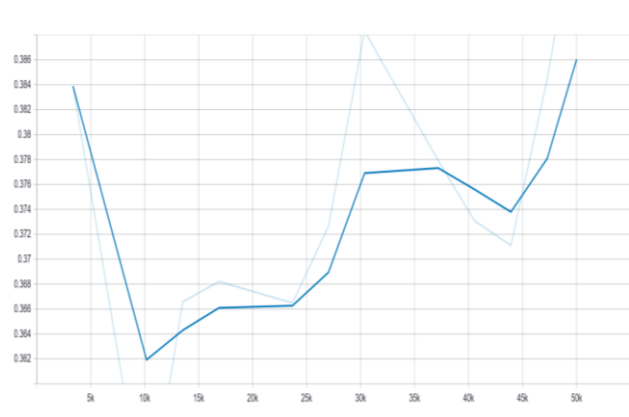


Figure 3. Detection boxes precision map chart

Detection boxes Precision mAP graph is shown in Fig. 4. The scores in the mAP graph are related to capturing objects located between pixels lower than 32². In the figure, the approximate value of the ResNet architecture is 0.29. This value indicates that it can detect small size objects

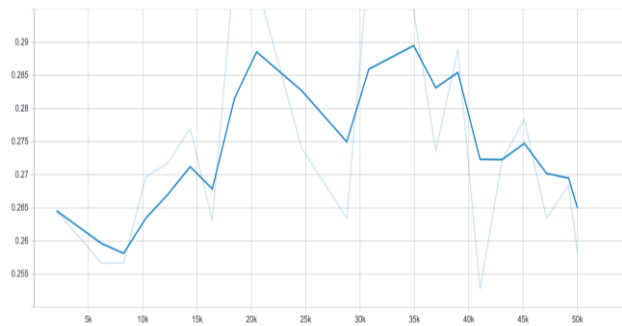


Figure 4. Detection boxes precision map chart

R-CNN architectures used for object detection are algorithms that give very successful results in the field of object detection. These algorithms identify the desired object by classifying the object detection. Since the network structures that use the location information of the object are multi-layered, many outputs are obtained. Each of these outputs has its unique Loss (error) graphs. The Loss (Error) graphs of the Faster R-CNN and ResNet architectures from the R-CNN architecture we used in our study are compared in Fig. 5 and Fig. 6.

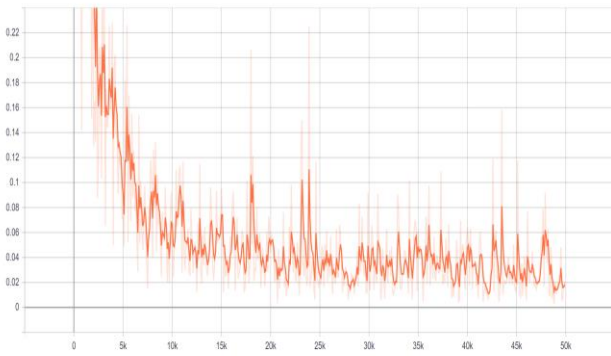


Figure 5. Faster R-CNN architecture loss graph

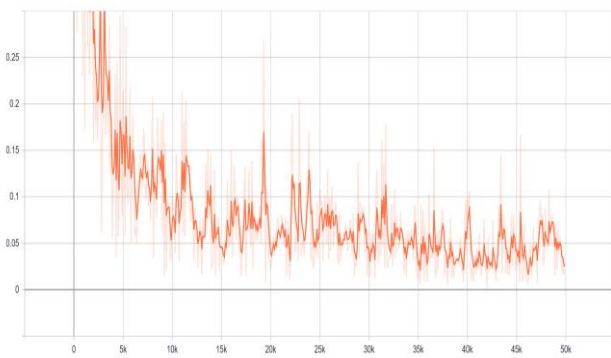


Figure 6. ResNet architecture loss graph

Faster R-CNN and ResNet architecture, Loss Error graphs approaching zero (0) show that both architects are successful. The loss value of the Faster R-CNN architecture is (0.02) and the Loss value of the ResNet architecture is (0.05), the error values of the two architectures are approximately zero, indicating that the R-CNN architectures are successful in object detection and identification applications for object detection.

The algorithms used during object detection make an estimate. The prediction success of the algorithms used in the study was evaluated with the test data set at hand. The targeted values in the data set are called ground truth (absolute reference). In Fig. 7 and Fig. 8, our ground truth values of the Faster R-CNN and ResNet architectures can be seen. The area framed in red is the ground truth, while the area framed with other colors shows the predicted (predict) objects.

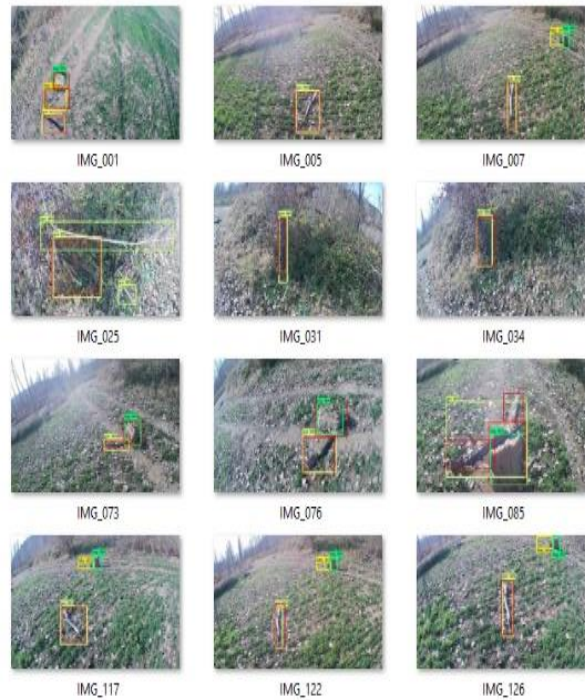


Figure 7. Faster R-CNN ground truth values

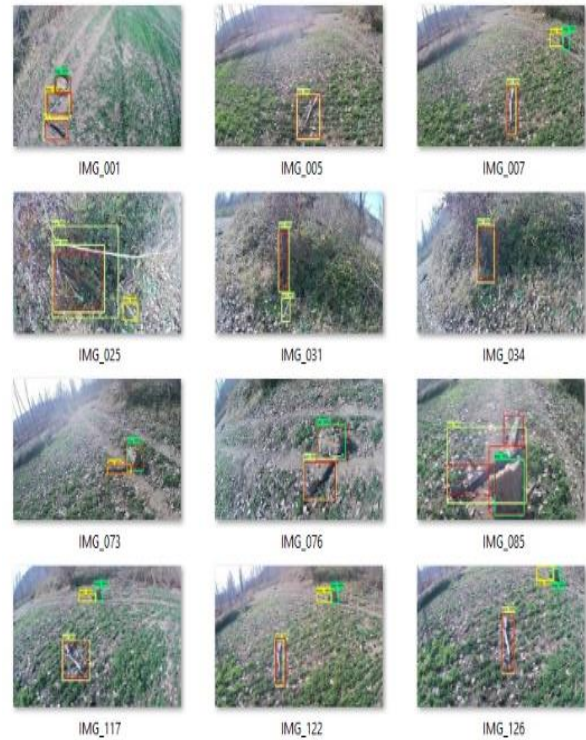


Figure 8. ResNet ground truth values

When the TP, FP and FN values obtained in the test data of the Faster R-CNN architecture used in the study are examined, it is seen that the correct classification values and the wrong classification values are quite high. The TP, FP, and FN values obtained for Faster R-CNN are shown in Table 2, while the results obtained for ResNet are shown in Table 3.

Table 2. TP, FP and FN values of Faster R-CNN algorithm

	TP	FP	FN	P1	P	R1	R	P.R	P+R	F1
IMG_001.jpg	3	0	0	3	1	3	1	1	2	1
IMG_007.jpg	1	2	0	3	0,33	1	1	0,33	1,33	0,49
IMG_016.jpg	1	0	0	1	1	1	1	1	2	1
IMG_022.jpg	1	0	0	1	1	1	1	1	2	1
IMG_025.jpg	1	2	0	3	0,33	1	1	0,33	1,33	0,49
.....
.....
.....
IMG_135.jpg	1	2	0	3	0,33	1	1	0,33	1,33	0,49
IMG_155.jpg	3	0	0	3	1	3	1	1	2	1
IMG_167.jpg	3	0	0	3	1	3	1	1	2	1
IMG_182.jpg	3	0	0	3	1	3	1	1	2	1
IMG_189.jpg	3	0	0	3	1	3	1	1	2	1

Table 3. TP, FP and FN values of ResNet algorithm

	TP	FP	FN	P1	P	R1	R	P.R	P+R	F1
IMG_001.jpg	3	0	0	3	1	3	1	1	2	1
IMG_007.jpg	1	2	0	3	0,33	1	1	0,33	1,33	0,49
IMG_016.jpg	1	0	0	1	1	1	1	1	2	1
IMG_022.jpg	1	0	0	1	1	1	1	1	2	1
IMG_025.jpg	1	2	0	3	0,33	1	1	0,33	1,33	0,49
.....
.....
.....
IMG_155.jpg	2	2	1	4	0,5	3	0,66	0,33	1,16	0,56
IMG_167.jpg	3	0	0	3	1	3	1	1	2	1
IMG_182.jpg	3	0	0	3	1	3	1	1	2	1
IMG_189.jpg	3	0	0	3	1	3	1	1	2	1
IMG_202.jpg	3	2	0	5	0,6	3	1	0,6	1,6	0,75

When the TP, FP and FN values obtained in the test data of the ResNet and RCNN architecture used in the study are examined, it is seen that the correct classification values and the wrong classification values are quite high.

Table 4. Recall, Precision, and F1-Score Values for R-CNN and ResNet when IoU=0.5

IoU=0.5					
R-CNN			ResNet		
Precision	Recall	F1-score	Precision	Recall	F1-score
0.62	0.88	0.72	0.64	0.94	0.76

The precision and Recall curve shows Precision and Recall equilibrium at different threshold values. High calling at the points indicated by the curve indicates the points where high precision intersects. This curve is understood from the curve directly related to the low value of FP and the low value of FN if the value of R is high for P to be high. The high P and R values in the curve are interpreted to be correct results in the classification made during object detection, and most of the results are detected correctly. In Fig. 9 and Fig. 10, P and R curves of the Faster R-CNN and ResNet architecture are shown.

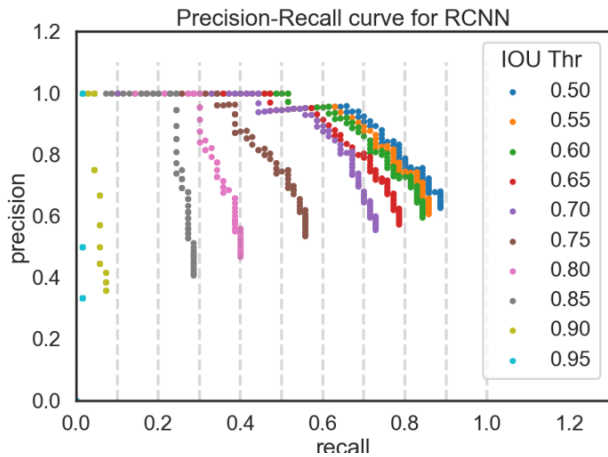


Figure 9. Precision recall curve of the Faster R-CNN architecture.

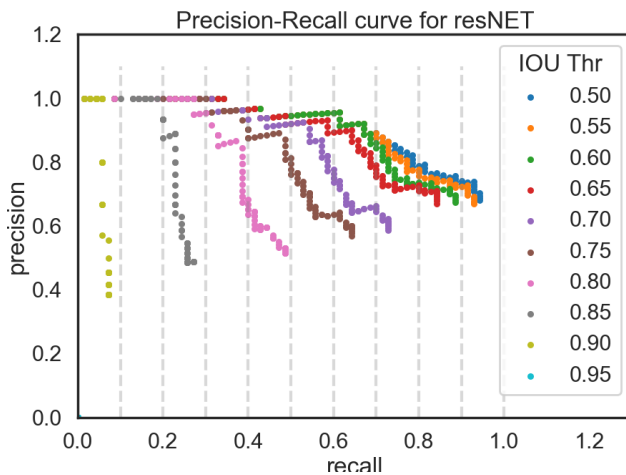


Figure 10. Precision recall curve of the ResNet architecture

The mAP value of the Faster R-CNN architecture in our training (50.84) and the mAP value of the ResNet architecture (52.17) are seen to be close to the sensitivity values of both architectures.

Results and Discussion

Object detection application was made by using deep learning algorithms in the data set of 200 images created in the study. The UAV used in the application made object detection using Faster R-CNN and ResNet algorithms from the data sets obtained from a height of 50 meters. In this application, it is seen in the results that Faster R-CNN and ResNet architectures are successful in object detection. The architectures used for Loss Error graphs are close to 0, indicating that the erroneous outputs are minimal during training. Obtaining the Faster R-CNN Loss value of (0.02) and the ResNet Loss value of (0.05) revealed the reason why both architectures were preferred in the detection of objects (weapons) in the images during training. Because the training was carried out in 50,000 steps in two architectures, the threshold value (0.5 - 0.95) ensured that the Precision and Recall values reached the

appropriate values for object detection. It is seen in the object detection on the image in the training results that the two architectures used can reach the accuracy values with 99% estimation.

Evaluation metrics Precision, Recall and F1-Score are used for the R-CNN and ResNet algorithms. In the metrics used, the recall rate of the ResNet algorithm was 0.94, and the recall rate of the RCNN algorithm was 0.88. When the precision values of these algorithms were compared, ResNet algorithms had a 0.64 ratio to R-CNN algorithms and a 0.62 ratio to ResNet algorithms. It seems to work more precisely than R-CNN algorithms.

In addition, the IoU calculation is calculated by dividing the area where the two rectangles intersect (intersection) by the junction area of these two rectangles. In our study, the 0.5 IoU value shows that ResNet and R-CNN algorithms are successful for object detection.

With the development of UAV technologies, the air flight altitude will vary, and the ResNet and R-CNN algorithms we use are considered to be successful at different altitudes.

Applications that are successful in object detection will be preferred in many areas in the future. This preferred R-CNN and ResNet will be transported to UAV usage areas and will be a very important step in catching up with today's technologies.

References

- [1] C. Gaszczak and T. Breckon, J. Han, "Real-time people and vehicle detection from uav imagery", *Intelligent Robots And Computer Vision*, pp. 1-13, 2011, Available:https://www.researchgate.net/publication/253357566_Realtime_People_and_Vehicle_Detection_from_UAV_Imagery
- [2] Y. Uzun, M. Bilban and H. Arıkan, "Tarım ve kırsal kalkınmada yapay zekâ kullanımı", VI. KOP Bölgesel Kalkınma Sempozyumu-KOPBKS, Konya, 2018.
- [3] C. Budak, M. Türk and A. Toprak, "Reduction in impulse noise in digital images through a new adaptive artificial neural network model", *Neural Comput & Applic*, vol. 26, no.4, pp. 835-843, 2015.
- [4] D. K. Prasad, "Survey of the problem of object detection in real images", *International Journal of Image Processing*, vol. 6, no. 6, pp. 441-466, 2012.
- [5] M. Kızrak and B. Bolat, "Derin öğrenme ile kalabalık analizi üzerine detaylı bir araştırma", *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, vol. 11, no.: 3, pp. 263-285, 2018.
- [6] R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell and J. Malik, "Region-Based Convolutional Networks for Accurate Object Detection and Segmentation", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.38, no.1, pp.142-158, 2016.
- [7] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun. Deep residual learning for image recognition. arXiv preprint arXiv:1512.03385,2015.

- [8] D. Du, Y. Qi and H. Yu, "The unmanned aerial vehicle benchmark: object detection and tracking", *Computer Vision Foundation*, 2018, Available: <https://arxiv.org/abs/1804.00518>
- [9] M. Radovic, O. Adarkwa and Q. Wang, "Object recognition in aerial images using convolutional neural networks", *Journal of Imaging*, vol. 3, no. 21, pp. 3-29, 2017.
- [10] D. Ye, J. Li and Q. Chen, "Deep learning for moving object detection and tracking from a single camera in unmanned aerial vehicles (uavs)", *Society for Imaging Science and Technology*, 2018, Available: <http://docserver.ingentaconnect.com/deliver/connect/ist/24701173/v2018n10/s17.pdf?expires>
- [11] N. Ammour, H. Alhichri and Y. Bazi, "Deep learning approach for car detection in UAV imagery", *Remote Sensing*, 2017, pp. 312
- [12] G. Zaccane, *Getting started with TensorFlow*. Kindle edition, pp.2, 2016.
- [13] Tensorflow, 2020, Available: <https://www.tensorflow.org/>
- [14] The PASCAL Visual Object Classes (VOC) Challenge, by Mark Everingham, Luc Van Gool, Christopher K. I. Williams, John Winn and Andrew Zisserman
- [15] C. Budak, V. Mençik, Detection of ring cell cancer in histopathological images with region of interest determined by SLIC superpixels method. *Neural Comput & Applic* (2022). <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07183-8>



Öz Dikkat Mekanizması Tabanlı Görü Dönüştürücü Kullanılarak Sıtma Parazit Tespiti

Malaria Parasite Detection Using Self-Attention Mechanism Based Vision Transformer

İbrahim Tuncel^{1*}, Abdülkadir Albayrak², Mehmet Akın³

¹ Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, eamibrhmtnc1@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4965-5134>

² Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, kadir.albayrak@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0738-871X>

³ Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, makin@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5439-4824>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 26 Mayıs 2022
Revizyon 25 Haziran 2022
Kabul 25 Haziran 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

Sıtma Teşhisi, bilgisayar destekli teşhis, vision transformer, derin öğrenme

ÖZ

Sıtma, tedavisiz olgularda ölümlerle sonuçlanabilen ve ciddi ateşli hastalığa yol açan bir enfeksiyon hastalığıdır. Bu yüzden bu hastalığın erken tanı ve tedavisi oldukça kritik öneme sahiptir. Gelişmiş teknolojilerle birlikte sıtma hastalığının teşhisine yönelik birçok klinik yöntem ve test kullanılmaktadır. Bu çalışmada Sıtma hastalığının teşhis edilmesi amacıyla son yıllarda doğal dil işleme alanında oldukça yüksek performans gösteren transformer yöntemlerinden esinlenilerek önerilen Vision Transformer (ViT) yöntemi kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ViT yönteminin %97.22 gibi yüksek bir sınıflandırma performansı elde ettiği gözlemlenmiştir. ViT yöntemi ile elde edilen sonuçlar, literatürde uygulanan geleneksel ve derin öğrenme yöntemleri karşılaştırılmış ve bu sonuçlar karşılaştırmalı olarak tabloda sunulmuştur. Uygulanan ViT modelinin sıtma hastalığı tespitinde başarılı sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 May 2022
Received in revised form 25 June 2022
Accepted 25 June 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Malaria Diagnosis, computer aided diagnosis, vision transformer, deep learning.

Doi: 10.24012/dumf.1120289

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Your Malaria is an infectious disease that can result in death in untreated cases and causes serious febrile illness. Therefore, early diagnosis and treatment of this disease is of critical importance. Along with advanced technologies, many clinical methods and tests are used for the diagnosis of malaria. In this study, the Vision Transformer (ViT) method, which has been inspired by the transformer methods that have shown very high performance in the field of natural language processing in recent years, is used to diagnose Malaria. When the obtained results were evaluated, it was observed that the ViT method achieved a high classification performance of 97.22%. The results obtained with the ViT method, traditional computer vision algorithms and deep learning methods applied in the literature were compared and the results were presented in a comparative table. It has been observed that the applied ViT model gives successful results in the detection of malaria.

Giriş

Sıtma, Plasmodium adı verilen parazitlerin, tedavisiz olgularda ölümlerle sonuçlanabilen ve ciddi ateşli hastalığa yol açan bir enfeksiyon hastalığıdır. Parazit, öncelikle insanlara en çok dişi anofel sivrisineklerin ısırıkları vasıtasıyla ulaşır oksijen taşıyan kırmızı kan hücrelerini etkileyecektir. Sıtma ile enfekte kişilerde, üşüme, titreme, ateş yükselmesi ve terleme döngüsü şeklinde görülen sıtma nöbetleri hastalığın karakteristik özelliğidir. Sıtma, dünyada çok büyük bir nüfusu tehdit eden bir hastalık olarak ılıman iklimlerde çok nadir rastlanırken, tropikal ülkelerde sıtma yaygın olarak

görülmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) verilerine göre dünya nüfusunun yarısı sıtma riski altında olup bu hastalık nedeniyle çoğu Afrika ve Uzak Asya ülkelerinde olmak üzere yılda yaklaşık 1 milyon kişi hayatını kaybetmektedir. Son yıllarda DSÖ, ölüm sayısının düştüğünü tahmin etse de sıtma dünyada halen önemli bir enfeksiyon hastalığı olmaya devam etmektedir. Dolayısıyla sıtma hastalığının ciddiyetini kavramak ve hastalığı önlemek için erken tanı testi ve tedavisi hayati öneme sahiptir. Sıtma teşhisi için klinik boyutlu birçok yöntem ve test kullanılmaktadır. Sıtmanın tanısında mikroskopik inceleme, hızlı tanı testleri, seroloji ve

moleküler yöntemler (PCR) kullanılabilir. Bunlar arasında en yaygın ve referans mikroskopi tanı yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde elde edilen periferik kan yayma görüntüleri, sıtma parazitlerinin etkin görsel tanımlamasını gerçekleştirmek için Giemsa lekeleme adı verilen popüler bir leke kullanılarak boyanır. Ancak yapılan bu test ve incelemeler uzmanlık gerektiren manuel işlemler çok zaman alıcıdır, insan hataları nedeniyle hatalı raporlar üretebilir ve kapsamlı teşhisler için de zahmetlidir. Bu, sıtma tespitini hızlı, kolay ve etkili erken teşhise yol açan bir yöntem kullanarak sıtmanın otomatik olarak saptanmasını önermemiz için bizi teşvik ediyor. Bu noktada, bilgisayar destekli sistemler, yapay zeka, açık kaynaklı araçlar, teknikler bu hastalığın tespiti ve değerlendirilmesi için uzmanlar için eşsiz bir araç haline gelmiştir. Bununla birlikte hem daha az maliyetli hem de daha nesnel sonuçlar ortaya koymaktadır. Sıtma hastalığının sınıflandırılmasında ve tespitinde literatürde birçok yöntem kullanılmıştır. Bunlar; evrişimsel sinir ağları temelli derin öğrenme algoritmaları, transfer öğrenme, derin inanç ağı (DBN), adaptif eşikleme ve morfolojik görüntü işleme algoritmaları, gerçek zamanlı nesne algılama algoritmaları (YOLOV3 ve YOLOV4),Yapay Sinir Ağları (YSA), Destek Vektör Makine (DVM), k- En Yakın Komşuluk algoritması (k-Ek), AdaBoost algoritması, Otsu metodu, Çok Katmanlı Algılayıcı , Radyal tabanlı fonksiyon sınıflandırıcı ve Evrişimsel sinir ağları(ESA) ve birçok alanda kullanılan derin öğrenme algoritmalarıdır. **Vijayalakshmi ve arkadaşları**, yaptıkları çalışmada transfer öğrenme kullanarak enfekte olmuş falciparum sıtma parazitinin tanımlanması için yeni bir derin sinir ağı modeli önermişlerdir. Önerilen transfer öğrenme yapısı VGG ağı ve Destek Vektör Makinesi (DVM) birleştirilerek elde edilmiştir. Dijital sıtma görüntüleri, VGG19-DVM'nin performansını analiz etmek için kullanılmıştır, bu da enfekte olmuş falciparum sıtma parazitinin tanımlanmasında % 93.1 oranında sınıflandırma doğruluğu ile sonuçlanmıştır [1]. **Rajaraman ve arkadaşları**, çalışmalarında hastalık taramasının iyileştirilmesine yardımcı olmak için parazitli ve parazit bulaşmamış hücrelerin sınıflandırılmasında önceden eğitilmiş evrişimsel sinir ağı (ESA) temelli derin öğrenme (DÖ) modellerini özellik çıkarıcı olarak kullanmışlardır. Özellik çıkarımı için en uygun model katmanlarını belirlemeye çalışmışlardır [2]. **Dong ve çalışma arkadaşları**, yaptıkları çalışma ile sıtma bulaşmış hücrelerin derin öğrenme yöntemleri kullanılarak otomatik olarak tanımlanmasını başarmışlardır. Çalışmalarında LeNet, AlexNet ve GoogLeNet olmak üzere en yaygın evrişimsel sinir ağlarını kullanmışlardır. Tüm ESA'ların, DVM yöntemi kullanılarak % 95'in üzerinde sınıflandırma doğruluğunu sağladığı gözlemlenmiştir [3]. **Bibin ve arkadaşları**, derin inanç ağı (DBN) kullanarak periferik kan yayma görüntülerinde sıtma parazitlerinin tespiti için yeni bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemde, parazit veya parazit olmayan toplam 4100 periferik kan yayma görüntüsünü sınıflandırmak için DBN'ye dayanan eğitilmiş bir model sunulmaktadır. Tavsiye edilen yöntem,% 89.66'lık bir F-skoru,% 97.60'lık bir duyarlılık ve % 95.92 özgüllüğü ile diğer modern yöntemlerden önemli ölçüde daha iyi bir performans göstermiştir [4]. **Liang ve arkadaşları**, yaptıkları çalışmada, standart mikroskop lamları üzerindeki enfekte veya enfekte olmamış ince kan

yayma görüntülerinde tek hücreleri otomatik olarak sınıflandırmak için ESA temelli yeni bir makine öğrenme modeli önermektedir. 27.578 tek hücreli görüntüye dayanan on kat çapraz doğrulamada, yeni 16 katmanlı ESA modelinin ortalama doğruluğu % 97.37'dir [5]. **Hung ve arkadaşları**, yaptıkları çalışmada sıtma paraziti bulaşmış hücreleri tespit etmek ve sınıflandırmak için iki aşamalı yeni bir derin öğrenme modeli önermişlerdir. Hücreleri tespit etmek için daha hızlı bölge bazlı-ESA ve sınıflandırma için AlexNet ağlarını kullanmışlardır. Önerilen yöntemin doğruluk oranı % 98 elde edilmiştir [6]. **Narayanan ve arkadaşları**, yaptıkları çalışmada sıtma paraziti bulaşmış hücreleri tespit etmek ve sınıflandırmak için yeni bir ESA mimarisi modeli önermişlerdir. Bu kullanılan yöntemde %96,7'lik bir genel doğruluk sağlamıştır [7]. **Muneer ve arkadaşları ise**, çalışmalarında sıtma paraziti bulaşmış hücreleri tespit etmek için görüntü işleme teknikleri ve sınıflandırma için ise karar ağacı kullanarak yeni model önermişlerdir. Önerilen yöntemde %88'lik bir genel doğruluk sağlamıştır [8].

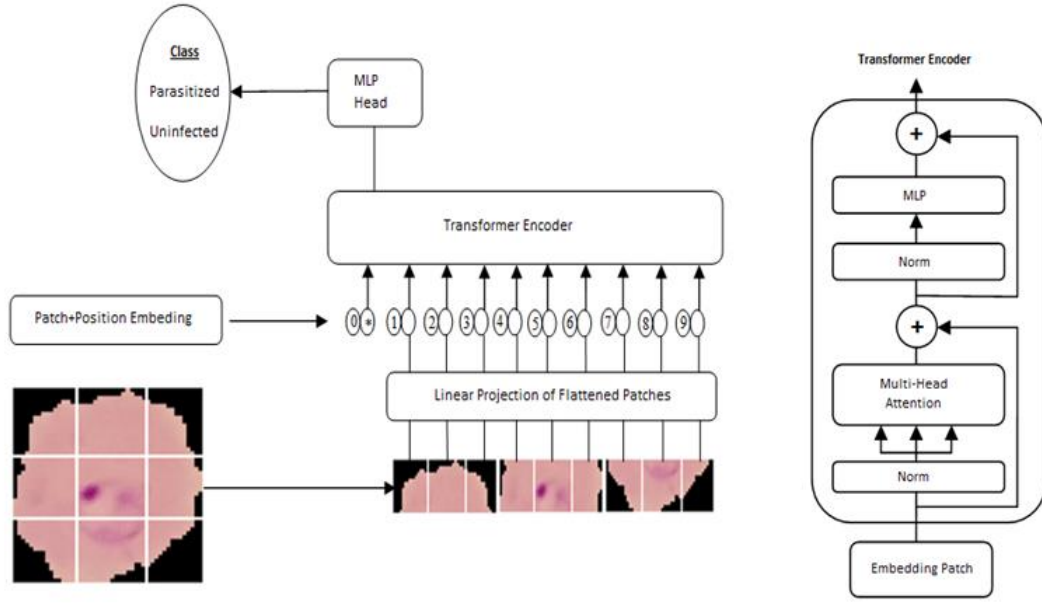
Bu çalışmada, sıtma hastalığının teşhisi ve sınıflandırılması için Vision Transformer (ViT) modeli kullanılmıştır. Amaç, kan hücresi görüntülerini "Parazit" veya "Enfekte olmayan" olarak sınıflandırmaktır. Yapılan çalışmada, Lister Hill Ulusal Biyomedikal İletişim Merkezi (LHNCBC) Ulusal Tıp Kütüphanesinden alınan sıtma veri seti kullanılmıştır. Veri seti 13779'u sıtma virüsü taşıyan ve 13779'u ise sağlıklı kırmızı kan hücre görüntüsü içermektedir [9]. Veri seti önerilen modelimize uygulandığında güncel metotlarla karşılaştırılabilir bir performans göstermiştir.

Materyal ve Metod

Vision Transformer (ViT) Modeli

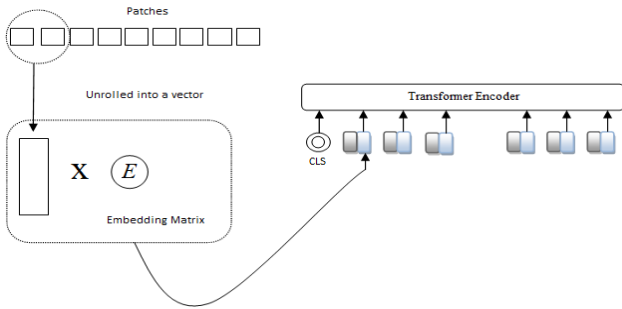
Transformer, giriş verilerinin her bir bölümünün önemini farklı şekilde ağırlıklandıran, kendi kendine dikkat mekanizmasını benimseyen bir derin öğrenme modelidir. Öncelikle doğal dil işleme (NLP) ve bilgisayarla görme alanlarında kullanılmaktadır. Transformatörler, çeviri ve metin özetleme gibi görevler için doğal dil gibi sıralı giriş verilerini işlemek üzere tasarlanmıştır [10]. Ancak, transformatörler verileri mutlaka sırayla işlemez. Bunun yerine, dikkat mekanizması girdi dizisindeki herhangi bir konum için bağlam sağlar. NLP'deki Transformer ölçekleme başarılarından esinlenerek, mümkün olan en az değişiklikle standart bir Transformer'ı doğrudan görüntülere uygulamayı denedik. Bunu yapmak için, bir görüntüyü yamalar halinde böleriz ve bir Transformer'a bir girdi olarak bu yamaları doğrusal gömme sırasını sağlarız. Görüntü yamaları, bir NLP uygulamasında belirteçler (kelimeler) ile aynı şekilde ele alınır. Modeli denetimli bir şekilde görüntü sınıflandırma konusunda eğitiyoruz.

Modele genel bir bakış Şekil 1'de gösterilmektedir. Standart bir Transformer, giriş olarak 1D jeton yerleştirme dizisini alır. Bu nedenle, bir 2D görüntü için, görüntüyü bir dizi düzleştirilmiş 2D yamalar halinde yeniden şekillendirmemiz gerekir. Görüntü boyutları, yama boyutuna göre bölünebilir olmalıdır. Piksel eksikliğinin üstesinden gelmek için dolgu kullanılabilir. 1D'ye düzleştirmek hayati önem taşır.



Şekil 1. Önerilen ViT modelinin genel işlem adımları

Bunu çözmek için, Şekil 2'de görüntü yamaları, öğrenilmiş bir gömme matrisi E kullanılarak bir vektöre doğrusal olarak yansıtılır. Görüntü yamalarının konum bilgilerini korumak için transformatör kodlayıcıya geçilir. Bunu yapmak için, görüntünün sıra numarası kodlayıcıya aktarılır. Konumsal gömme vektörlerinin her biri parametreleştirilmiştir ve öğrenilebilir bir konumsal gömme tablosu oluşturacaktır. Gömme yama dizisi elde edildikten sonra, bunlar transformatör kodlayıcıya geçirilir [11]. Bir transformatör kodlayıcı, L özdeş katmanlardan oluşur ve her katmanda, çok başlı öz-dikkat (MSA) bloğu ve çok katmanlı algılayıcı (MLP) bloğu olan iki ana bileşene sahiptir (Denklem 2,3). Katman normalizasyonu, her bloktan önce ve her bloktan sonra kalan bağlantılara birlikte uygulanır. [13].



Şekil 2. ViT modelinin bir aşaması olan kesit kodlayıcı aşaması

Transformer, tüm katmanları boyunca sabit gizli vektör boyutu D kullanır, bu yüzden yamaları düzleştiririz ve eğitilebilir bir doğrusal izdüşümle (Denklem 1) D boyutlarına eşler. Bu izdüşümün çıktısını yama yerleştirmeleri olarak adlandırılır.

BERT' in [sınıf] belirtecine benzer şekilde, Transformer kodlayıcısının (z_L^0) çıkışındaki durumu y görüntü temsili olarak hizmet eden gömülü yamalar dizisine $(z_0^0 = x_{class})$ öğrenilebilir bir yerleştirme hazırlıyoruz (Denklem 4). Hem

ön eğitim hem de ince ayar sırasında, (z_L^0) 'ye bir sınıflandırma başlığı eklenir. Sınıflandırma başlığı, ön eğitim zamanında bir gizli katmana ve ince ayar zamanında tek bir doğrusal katmana sahip bir MLP tarafından uygulanır [11].

MLP, arada bir GeLU doğrusal olmayan aktivasyon ile iki tam bağlı katmandan oluşur.

$$z_0 = [x_{class}; x_p^1 E; x_p^2 E; \dots; x_p^N E] + E_{pos},$$

$$E \in R^{(P^2 \cdot C) \times D}, E_{pos} \in R^{(N+1) \times D} \quad (1)$$

$$z'_l = MSA(LN(z_{l-1})) + z_{l-1}, \quad l = 1 \dots L \quad (2)$$

$$z_l = MLP(LN(z'_l)) + z'_l, \quad l = 1 \dots L \quad (3)$$

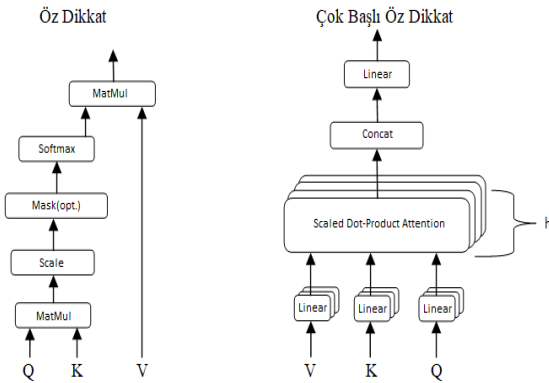
$$y_l = LN(z_L^0) \quad (4)$$

Transformer modelinin ortaya çıkmasında en etkili kısım dikkat mekanizmasıdır. Dikkat mekanizması, girdi dizisine bakar ve dizinin her adımda önemini koruyan bölümlerini seçerek, dizinin hangi bölümlerinin önemli olduğu bilgisini korur. Dikkat mekanizması, anlık olarak birkaç diğer girdi verisini de hesaba katar ve bu girdilere farklı ağırlıklar atayarak önceliklendirme sağlar. Tüm kodlayıcı katmanları, her bir girdi için diğer tüm girdilerin uygunluğunu ölçer ve çıktıyı üretmek için uygun bilgileri alan bir dikkat mekanizması kullanır. Ardından dikkat mekanizması sonucunda çıktı olarak gönderilen ağırlıkları ve kodlanmış

şekilde olan diziyi girdi olarak alır. Bu ağlar, tekrarlanan çok başlı dikkat bloklarından ve ileri beslemeli katmanlardan oluşur. Çok başlı dikkat, dikkat mekanizmasındaki işlemleri paralel olarak çalıştırır ve sonuçları birleştirir. Böylece, farklı ilişkilerin öğrenilmesi sağlanmış olur [12]. Girdiye ait özelliklerden doğrusal dönüşümler ile sorgu (Q), anahtar (K) ve değer (V) matrisi oluşturulur [14]. Çıktı, sorgu, anahtar matrislerinin nokta çarpımının anahtar vektörün boyutunun köküne bölünmesiyle hesaplanır daha sonra Softmax işlevi uygulandıktan sonra değer matrisi ile çarpılır ve dikkat hesaplanır (Denklem 4). Bu hesaplama aşağıdaki denkleme dayanmaktadır. Bu nokta çarpımında kullanılan Q, K ve V, hepsi aynı verilerden türetildiklerinde Öz-Dikkat olarak adlandırılır [12].

$$Dikkat(Q, K, V) = softmax\left(\frac{Q^T K}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (5)$$

Çok başlı öz dikkat (MSA), girdiyi h küçük parçalara böler, girdilere paralel olarak birkaç kez dikkat uygular. Bunun nedeni, Q, K ve V'yi birden çok kez yansıtmanın sisteme bir bütün olarak fayda sağlayabilmesidir. Böylece MSA, farklı konumlardaki farklı alt uzaylardan gelen bilgilere katılabilir. Bir katmandaki tüm başların çıktıları birleştirilir, normalize edilir ve bir sonraki katman için girdi olarak ileri besleme ağı tarafından işlenir [12].



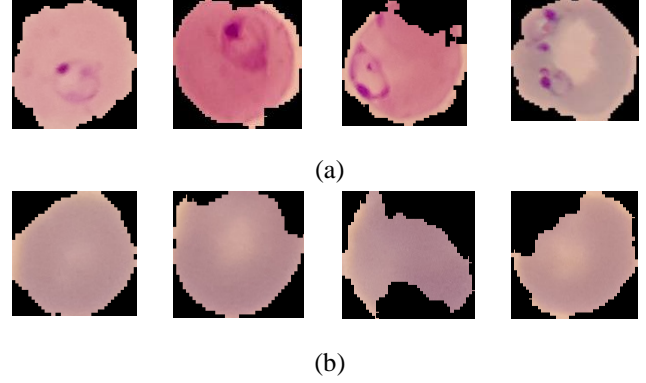
Şekil 3. ViT modelinin temelini oluşturan adımlardan biri olan öz dikkat mekanizması

Deneysel Sonuçlar

Veri kümeleri

Bu çalışma, Ulusal Sağlık Enstitüsü (NIH) tarafından oluşturulan veri setinden Giemsa ile boyanmış ince kan (kırmızı kan hücresi) görüntüleri üzerinde gerçekleştirilmiştir [9]. Akıllı telefonun dahili kamerası ile her bir mikroskopik görüş alanı için slayt görüntüleri alındı. Görüntüler, Tayland'daki Mahidol-Oxford Tropical Tıp Araştırma Birimi'ndeki uzman bir slayt okuyucu tarafından manuel olarak açıklanmıştır. Veri kaynağı Chittagong Medical College

Hospital, Bangladeş arşivlenmiş kan yayma görüntüleri ve orijinal görüntülerden eritositlerin segmentasyonu kullanıldı. Veri seti, parazitlenmiş ve enfekte olmamış hücrelerin eşit örneklerine sahip 27.558 hücre görüntüsünü içerir. Çalışmamızda, sınıf üstünlüğünü önlemek için veri setini her iki sınıfa eşit olarak ayırdık. Veri kümesinden alınan örnek görüntüler aşağıda Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 4: Sıtma veri setinden alınan parazitlenmiş hücrelerin (a) ve enfekte olmamış hücrelerin (b) örnek mikroskop görüntüleri

Önerilen Transformer Based Yöntem ile elde edilen sonuçlar

Çalışma kapsamında kullanılan ViT modelinin 5-kat çapraz geçerlilik uygulanmış veri kümesindeki performansı literatürde önerilen diğer yöntemlerle karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 1'de gösterilmiştir. Geleneksel yöntemlerle elde edilen sonuçlar derin öğrenme yöntemlerine nispeten daha düşük performans gösterdiği için karşılaştırma amacıyla eklenmemiştir. Bu çalışmada derin öğrenme yöntemleri ve ViT modeli performansları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde literatürde en yaygın kullanılan derin öğrenme yöntemlerine (LeNet, GoogleNet, AlexNet, EfficientNet) oranla ViT modeli daha yüksek başarı elde etmiştir. Buna ek olarak farklı veri kümeleri ile eğitilip transfer öğrenme ile ağırlıkların bu veri kümesinde kullanıldığı diğer bazı modeller ve tamamiyle bu veri kümesine özel geliştirilmiş veri kümelerine oranla ViT modeli yine daha yüksek başarı göstermiştir. ViT modelinin farklı derin öğrenme tabanlı özelliklerinin birleştirilerek daha ayırt edici özellik vektörlerinin çıkarılmaya çalışıldığı modellere göre nispeten daha düşük başarı gösterdiği gözlemlenmiştir. Burada kullanılan ViT modeli standart model olduğundan bu amaçla özelleştirilecek bir modelin performansı daha yukarı taşıyacağı düşünülmektedir. ViT modellerinde yüksek performans elde etmek amacıyla yüksek donanım kapasitelerinin kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan ekran kartı işlemcisinin 8GB bellek kapasitesine sahip olması buna bağlı olan bazı parametrelerin sınırlandırılmasını zorunlu kıldığından daha yüksek başarı elde edilmesinin önüne geçmiştir.

Tablo 1. Uygulanan ViT modeli ile elde edilen sonuçlar ve literatürdeki yöntemlerle karşılaştırılması

Modeller	Veri Seti	Algoritma	Sınıflandırıcı Başarı Oranları
Diker A. [15]	Lister Hill National Center for Biomedical Communications (LHNCBC) [9]	CNN (ShuffleNet)	%96.44
Masud ve diğ. [16]	Lister Hill National Center for Biomedical Communications (LHNCBC) [9]	CLR-triangular2	%97.30
Akilotu ve diğ. [18]	Lister Hill National Center for Biomedical Communications (LHNCBC) [9]	Transfer öğrenme ve VGGNet	%96.02
Liang ve diğ. [5]	Lister Hill National Center for Biomedical Communications (LHNCBC) [9]	CNN	%97.37
Dong ve diğ [3]	PEIR-VM[19]	LeNet, AlexNet, GoogLeNet	%96.18
Rajaraman ve diğ [2]	Lister Hill National Center for Biomedical Communications (LHNCBC) [9]	CNN(cell level)	%98.13
Bibin ve diğ [4]	Lister Hill National Center for Biomedical Communications (LHNCBC) [9]	Deep Belief Networks (DBN)	F-skoru: %89.66 Hassasiyet: %97.60 Özgünlük: %95.92
Montalbo F. J. P. ve Alon A. S. [20]	Lister Hill National Center for Biomedical Communications (LHNCBC)) [9]	EfficientNetB0	%94.70
Mahmud T. ve Fattah S. A. [17]	Lister Hill National Center for Biomedical Communications (LHNCBC) [9]	DeepFusionNet	%99.50
Irmak E. [21]	Lister Hill National Center for Biomedical Communications (LHNCBC) [9]	A Novel CNN	%95.28
Narayanan ve diğ [7]	Lister Hill National Center for Biomedical Communications (LHNCBC) [9]	Custom CNN	%96.70
Fatima T. ve Farid M. S. [22]	Lister Hill National Center for Biomedical Communications (LHNCBC) [9]	Bilateral filter	%91.80
Vijayalakshmi ve diğ. [1]	Mamic image database[25]	VGGNet ve SVM	%93.10
Abdurahman F. ve diğ. [26]	1182 color microscopic images of thick blood smear malaria slides (publicly malaria dataset)	YOLOV3 YOLOV4	%96.32 %96.14
Saiprasath G. ve diğ. [23]	2703 blood smear images 133 individuals[24]	AdaBoost, Decision Tree, KNN, Linear Regression, Naive Bayes, Random Forest, Extra Tress	%96.20 %94.60 %94.00 %94.30 %85.80 %96.50 %95.60
Önerilen ViT Modeli	Lister Hill National Center for Biomedical Communications (LHNCBC)	Transformer	%97.22±1

ViT modellerinin geliştirilmesinde önemli parametrelerin başında girdi görüntüsünün boyutları ve her biri doğal dil işlemedeki kelimeye karşılık gelen küçük görüntü kesitleri gelmektedir. Girdi görüntüsü toplamda kaç parça görüntü kesitine bölünecekse işlem maliyeti ve elde edilen performans buna göre değişmektedir. Bu çalışmada 128*128 boyutlarına sahip girdi görüntüsü, 16x16'lık görüntü kesitlerine bölünmüştür. ViT modellerinde normalizasyon amacıyla uygulanan transformer katmanlarının sayısı (transformer layer) parametre olarak kullanıcı tarafından verilmektedir. Bu çalışmada 4 adet transformer katmanı uygulanmıştır. Buna ek olarak her bir dikkat mekanizması transformer kodlama katmanında arka arkaya uygulanagelen işlemlerdir. Bu dikkat mekanizmalarının uçlarına buradan elde edilen çıktılar bir sonraki aşamaya iletmek için başlık (head) kullanılmaktadır. Bu başlıklar tek bir dikkat mekanizmasından elde edilebileceği daha düşük boyutlu bir uzayda çoklu hesaplamalar olarak da yapılabilmektedir. Bu işlemler sistemin performansını arttırmak amacıyla yapılmaktadır. Daha sonra bu başlıkların sonuçları birleştirilmektedir. Çalışma kapsamında 5 adet başlık kullanılmıştır. Standart derin öğrenme yöntemlerinde olduğu gibi ViT modellerinde de yığın boyutu, epoch sayısı ve öğrenme katsayısı mevcuttur. Bu çalışmada epoch sayısı, öğrenme katsayısı ve yığın boyutu için sırasıyla, 500, 0.001 ve 128 değerleri kullanılmıştır.

Tüm testler, AMD Ryzen 7 2700 8 çekirdekli 3.2 ghz, 32GB RAM ve NVIDIA Geforce RTX 2060 SUPER 8GB içeren bir iş istasyonunda tensorflow kütüphanesi ve Spyder (Python 3.7 ile) ortamı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tartışma

Bu çalışmada Malaria hücrelerinin sınıflandırılmasında son dönemde doğal dil işlemede oldukça başarılı performans veren dönüştürü modellerinin bir türevi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan ViT modeli standart ViT modelinden esinlenerek geliştirilen ViT modelidir. ViT modelleri doğal dil işleme veya görüntü kesitleri farketmeksizin öbekler arasında ilişki hesapladıklarından yüksek boyutta kaynak gereksinimi duymaktadır. Daha büyük kapasiteli donanımlarda yüksek başarı elde edildiğinden son dönemde birçok alanda oldukça popüler olmuşlardır. Bu çalışmada da malaria hücrelerinin sınıflandırılmasında ViT modellerinden yararlanılması amaçlanmıştır. Deneysel sonuçlar başlığı altında elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ViT modellerinin literatürde sıkça kullanılan bir çok yöntemden daha yüksek performans gösterdiği gözlemlenmektedir. Geleneksel görüntü işleme yöntemleri malaria tespitinde belirli bir başarının üzerine çıkamazken, derin öğrenme tabanlı yöntemler %90'ların üzerinde performans göstermektedir. Bu çalışmada temel odak noktası da derin öğrenme yöntemleri ile ViT modelinin karşılaştırılması ve avantaj

ve dezavantajların analiz edilmesidir. ViT modeli önceden eğitilmiş LeNet, AlexNet, GoogleNet, EfficientNet gibi modellerin tekil olarak kullanılmasıyla elde edilen sonuçlardan daha iyi performans göstermiştir. Ancak yine derin öğrenme yöntemleri kullanılarak elde edilen öznetelik vektörlerinin birleştirilmesi ile elde edilen sınıflandırma başarısı standart ViT modelinden daha iyi performans göstermiştir. Bunda sınırlı donanım kaynaklarının etkisi olduğu görülmüştür. Çünkü ViT modelleri en az 30-40 GB mertebelerinde bellek boyutuna ihtiyaç duyarken bu çalışmada 8 GB bellek kapasiteli bir ekran kartı işlemcisi kullanılmıştır. Bu durum elde edilen sonuçların sınırlı kalmasına sebep olmuştur. Kaynakların artırılması ile bu performansın daha yukarı çıkması düşünülmektedir.

ViT modellerinde iyileştirilmesi gereken bir diğer nokta, yöntemde kullanılan parametrelerdir. Transformer katmanı, projeksiyon boyutu (projection dimension), başlık sayısı(number of head),

Sonuç

Bu çalışmada son dönemde doğal dil işleme alanında oldukça yüksek performans gösteren ViT modeli Sıtma hastalığının tespitinde kullanılmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar literatürde önerilen geleneksel görüntü işleme yöntemleri ve derin öğrenme tabanlı yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde Öneirlen ViT modelinin geleneksel yöntemler ve bazı derin öğrenme yöntemlerinden nispeten daha başarılı olduğu ancak derin öğrenme tabanlı özelliklerin birleştirildiği çalışmalarla yakın sonuçlar verse de nispeten daha az başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Bunun ana sebebi ViT modellerinin yüksek performans elde etmek için büyük boyutlu donanım kaynaklarına ihtiyaç duymasıdır. Gelecek çalışmalarda bu çalışmada kullanılan donanım kaynaklarından daha büyük boyutlu kaynaklar kullanarak başarıyı yükseltmeyi amaçlamaktayız.

Kaynaklar

- [1] A. Vijayalakshmi and B. Rajesh Kanna, "Deep learning approach to detect malaria from microscopic images", *Multimedia Tools and Applications*, vol. 79, 2019.
- [2] S. Rajaraman et al., "Understanding the learned behavior of customized convolutional neural networks toward malaria parasite detection in thin blood smear images", *J. Med. Imag.*, vol. 5, no. 3, Jul. 2018.
- [3] Y. Dong et al., "Evaluations of deep convolutional neural networks for automatic identification of malaria infected cells", *Proc. IEEE EMBS Int. Conf. Biomed. Health Inform. (BHI)*, pp. 101-104, 2017.
- [4] D. Bibin, M. S. Nair and P. Punitha, "Malaria Parasite Detection From Peripheral Blood Smear Images

- Using Deep Belief Networks," in IEEE Access, vol. 5, pp. 9099-9108, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2705642.
- [5] Z. Liang et al., "CNN-based image analysis for malaria diagnosis," 2016 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM), 2016, pp. 493-496, doi: 10.1109/BIBM.2016.7822567.
- [6] J. Hung and A. Carpenter, "Applying Faster R-CNN for Object Detection on Malaria Images," 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2017, pp. 808-813, doi: 10.1109/CVPRW.2017.112.
- [7] B. N. Narayanan, R. Ali and R. C. Hardie, "Performance analysis of machine learning and deep learning architectures for malaria detection on cell images", *Applications of Machine Learning*, vol. 11139, pp. 11139W, September 2019.
- [8] S. Muneer, S. Jatou, B. Naz, "Detection of Noisy Blood Images Indicating Prodromal Diseases", *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, Vol(12), Issue(6), pp. 001-006, 2018.
- [9] lhncbc.nlm.nih.gov, "Lister Hill National Center for Biomedical Communications", 2021. [Çevrimiçi]. <https://ceb.nlm.nih.gov/repositories/malaria-datasets/> [Erişim Tarihi: 15.05.2021]
- [10] J. Devlin, M. W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *In NAACL*, 2019.
- [11] A. Dosovitskiy, L. Beyer, A. Kolesnikov, D. Weissenborn, X. Zhai, T. Unterthiner, ..., et al., "An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale", *In ICLR*, 2021.
- [12] A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, et al., "Attention is all you need", *Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 6000-6010, 2017.
- [13] Q. Wang et al., "Learning deep transformer models for machine translation", *Proc. Annu. Meeting Assoc. Comput. Linguistics*, pp. 1810-1822, 2019.
- [14] T. Czempiel, M. Paschali, D. Ostler, S. T. Kim, B. Busam and N. Navab, "OperA: Attention-regularized transformers for surgical phase recognition", *arXiv:2103.03873*, 2021, [online] Available: <http://arxiv.org/abs/2103.03873>.
- [15] A. Diker, "Sıtma Hastalığının Sınıflandırılmasında Evrişimsel Sinir Ağlarının Performanslarının Karşılaştırılması", *BEÜ Fen Bilim. Derg.*, vol. 9, no. 4, pp. 1825-1835, 2020.
- [16] M. Masud, H. Alhumyani, S. S. Alshamrani, O. Cheikhrouhou, S. Ibrahim, G. Muhammad, et al., "Leveraging deep learning techniques for malaria parasite detection using mobile application", *Wireless Commun. Mobile Comput.*, vol. 2020, pp. 1-15, Jul. 2020.
- [17] T. Mahmud, & S. A. Fattah, "Automatic Diagnosis of Malaria from Thin Blood Smear Images using Deep Convolutional Neural Network with Multi-Resolution Feature Fusion", *arXiv preprint arXiv:2012.05350*. 2020.
- [18] B. N. Akılotu, Z. Kadiroğlu, A. Şengür and M. Kayaoğlu, "Evrişimsel Sinir Ağları ve Transfer Öğrenme Yöntemi Kullanılarak Sıtma Tespiti", *International Engineering and Science Symposium*, Siirt, 2019.
- [19] Whole slide image for malaria infected red blood cells, [Çevrimiçi] Erişim: <http://peir-vm.path.uab.edu/debug.php?slide=IPLab11Malaria> [Erişim Tarihi: 15.05.2021].
- [20] F. Montalbo and A. Alon, "Empirical Analysis of a Fine-Tuned Deep Convolutional Model in Classifying and Detecting Malaria Parasites from Blood Smears", *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 15, no. 1, 2021.
- [21] E. Irmak, "A novel implementation of deep-learning approach on malaria parasite detection from thin blood cell images", *Electrica* 21(2):216-224. 2021. <https://doi.org/10.5152/electrica.2020.21004>.
- [22] T. Fatima and M.S Farid, "Automatic detection of Plasmodium parasites from microscopic blood images", *Journal of Parasitic Diseases*, vol. 44, no. 1, pp. 69-78, 2020.
- [23] G. Saiprasath, N. Babu, J. ArunPriyan, R. Vinayakumar, V. Sowmya and K. Soman, Performance comparison of machine learning algorithms for malaria detection using microscopic images, 2019.
- [24] J. A. Quinn, A. Andama, I. Munabi, F. N. Kiwanuka, "Automated blood smear analysis for mobile malaria diagnosis", *Mobile Point-of-Care Monitors and Diagnostic Device Design*, 31-115, 2014.
- [25] <http://fimm.webmicroscope.net/Research/Momic/mamic> WebMicroscope "Institute for molecular medicine Finland and FIMM". <http://fimm.webmicroscope.net/Research/Momic/mamic>, [Erişim Tarihi: 1 June 2018]
- [26] F. Abdurahman, KF Anlay and M Aliy, "Malaria Parasite Detection in Thick Blood Smear Microscopic Images Using Modified YOLOV3 and YOLOV4 Models", *Research Square*, 2020.



İşbirlikçi Yapay Zeka Konsepti: Federe Öğrenmeye Genel Bir Bakış

*Collaborative Artificial Intelligence Concept: Federated Learning Review*Mehmet Nergiz^{1*}¹ Dicle Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, mnergiz@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0867-5518>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

*Makale Geçmişi:*Geliş 14 Haziran 2022
Revizyon 17 Haziran 2022
Kabul 24 Haziran 2022
Online 28 Haziran 2022*Anahtar Kelimeler:**Federe Öğrenme, Merkezi Öğrenme, Dağıtık Öğrenme, Büyük Veri, Veri gizliliği, Makine Öğrenmesi*

Yapay zeka (YZ) gücünü büyük veriden almaktadır. Ancak büyük veriye ulaşmak ve bu veriyi işlemek, gerek gizlilik, gerekse büyük verinin işlenmesi için gereken donanımsal ihtiyaçlardan ötürü her zaman mümkün olmayabilmektedir. Federe öğrenme (FÖ); bahsi geçen gizlilik & büyük veri ikilemini çözebilmek adına önerilen yeni bir konsepttir. FÖ, ortak bir YZ model parametrelerinin katılımcılar üzerinde güncellenmesi ve güncellenen parametrelerin koordinatör vasıtasıyla birleştirilmesini gerçekleştiren, bunu yaparken de veri gizliliğini koruyan bir çerçevedir. FÖ, mimarisini gereği veri gizliliği korunurken aynı zamanda iş yükü de paylaştırılmış olur. Ayrıca katılımcı sayısı açısından ölçeklenebilirlik ile beraber kimi problemlerde daha yüksek başarımları, daha düşük çalışma süreleri gibi avantajlar da sunar. İşbirlikçi yapan katılımcıların öznitelik ve örnek uzaylarının ne ölçüde ortak olduğuna bağlı olarak yatay, dikey ve transfer FÖ yaklaşımları mevcuttur. Makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanıldığı ve veri gizliliğinin önem arz ettiği her alanda FÖ kullanım alanı bulmaktadır. Sağlık hizmetleri, nakliye sektörü, finansal teknolojiler ve doğal dil işleme alanları yatay FÖ konseptinin kullanıldığı alanların başında gelmektedir. Öte yandan, dikey ve transfer FÖ konseptleriyle sektörler arasında YZ bazlı işbirlikleri geliştirilebilmektedir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

*Article history:*Received 14 June 2022
Received in revised form 17 June 2022
Accepted 24 June 2022
Available online 28 June 2022*Keywords:**Federated Learning, Centralized Learning, Distributed Learning, Big Data, Data Privacy, Machine Learning*

Artificial intelligence (AI) draws its power from big data. However, accessing and processing big data may not always be possible due to both confidentiality and hardware requirements for high computational performance. Federated learning (FL) is a new concept proposed to solve the aforementioned privacy & big data dilemma. FL is also a framework that performs updating of the parameters of a common AI model trained by the different participants and then combining the updated parameters through the coordinator while protecting data privacy. Due to the modular design of the FL concept, the workload is shared among the participants while protecting data privacy. It also provides advantages like scalability in terms of collaborator count and higher performance and lower execution time for some sort of problems. Depending on the similarity of the feature and sample spaces of the collaborators, there are some FL approaches such as horizontal, vertical and transfer. FL is applicable to any field in which machine learning methods are utilized and the data privacy is an important issue. Healthcare services, transportation sector, financial technologies and natural language processing are the prominent fields where horizontal FL concept is applied. On the other hand, AI-based collaborations between the sectors can be developed with vertical and transfer FL concepts.

Doi: 10.24012/dumf.1130789

* Sorumlu Yazar

Giriş

Teknolojik gelişimlere paralel olarak finans, sağlık, eğitim, alışveriş, iletişim gibi hayatın her alanında dijital ortamlarda devasa boyutlarda veri üretilmektedir. Üretilen bu veriler Yapay Zeka teknolojilerinin hammaddesini oluşturmaktadır. Yapay Zeka teknolojileri, siber güvenlik [1], otonom araçlar [2], hastalık teşhisi [3], uzaktan eğitim [4], çeşitli zaman serisi tahmin sistemleri gibi birçok stratejik alanda kullanılırken büyük verilere ihtiyaç duymaktadır. Geleneksel merkezileştirilmiş

öğrenme, yerel cihazlardan toplanan tüm verilerin bir veri merkezinde veya bulut sunucusunda depolanmasını gerektirir. Bu gereklilik yalnızca gizlilik riskleri ve veri sızıntısı endişesini artırmakla kalmaz, aynı zamanda veri miktarı çok büyük olduğunda büyük depolama alanları ve yüksek kapasiteli işlemci gibi ihtiyaçları doğurur. Birden çok makinenin farklı veri gruplarıyla bir model replikasını paralel olarak eğitmesini sağlayan dağıtık öğrenme [5], depolama ve hesaplama kapasitesi sorununa potansiyel bir çözüm olarak hizmet etse de, veriyi önceden bölmek için tüm eğitim verilerine erişmesi gerekir.

Buna karşın veri gizliliği bakımından kişisel ve toplumsal hassasiyet artmaktadır. Dünya üzerinde birçok kurum verisini stratejik, hukuki ve ticari kaygılar sebebiyle paylaşmamaktadır. 2018 'de Facebook 'ta veri tabanlarından birçok kişisel verinin çalınması hadisesinin tetiklemesi ile Avrupa Birliği Genel Veri Koruma Tüzüğü'nde [6] yer almıştır. Böylece, kişisel veri gizliliği kanuni bir zemine oturtulmuştur. Tüzüğe göre herhangi bir kurum veya kuruluş, anlaşmaları olmadıkça, kullanıcının kendi verilerini kullanma yetkisine sahip değildir.

Yukarıda bahsi geçen, büyük veriye erişim & veri gizliliği ikileminden esinlenerek Google Yapay Zekâ ekibi 2016 'da, dağıtık ve gizliliği koruyan Federe Öğrenme (FÖ) [7] konseptini önermiştir. FÖ konsepti veri gizliliğini korurken aynı zamanda mimari yapısından ötürü iş yükünü de dağıtmış olur.

Literatüre kazandırıldığı günden beri FÖ konsepti gelişmekte ve araştırmacılar için oldukça geniş bir çalışma alanı sunmaktadır. Dünya çapında FÖ konsepti ile ilgili olarak araştırmacılar tarafından her yıl yüzlerce çalışma yapılmaktadır. Ancak gelişime son derece açık olan FÖ konseptine, ülkemizde yeterince ilgi gösterilmediği gözlemlenmektedir. Bu derleme Türkçe akademik yayın literatürüne öncü bir kaynak olması amacıyla hazırlanmıştır.

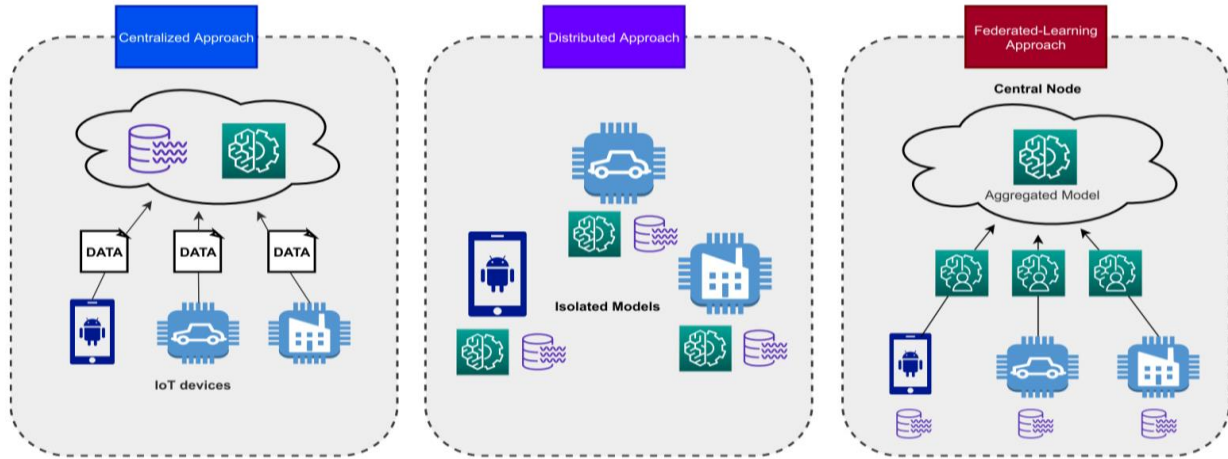
Makalenin geri kalan kısmında ilk olarak Merkezi öğrenme, Dağıtık Öğrenme ve FÖ karşılaştırmalı şekilde sunulmuştur. Sonra FÖ'nün temel dinamikleri ve avantajlarından bahsedilmiş ve FÖ'nün temel bileşenleri

ele alınmıştır. Sonrasında FÖ senaryoları tanıtılmış ve son olarak FÖ'nün kullanım alanları sunularak makale sonlandırılmıştır.

Merkezi Öğrenmeden Dağıtık Öğrenmeye, Dağıtık Öğrenmeden FÖ'ye

Yapay Zekâ, gelişim sürecinde zaman zaman popülerliğini yitirmiş olsa da son yıllarda yaşanan gelişmeler ile tekrardan ilgiyi üzerine çekmiştir. 2012 yılında yapılan 2012 ILSVRC ImageNet Büyük Ölçekli Görsel Tanıma yarışmasında AlexNet [8] derin öğrenme mimarisi birinci olmuştur. Örüntü tanımadaki hata oranını %26'lardan %15'lere indirmiştir. Öte yandan yapay zekâ programı ile Derin Öğrenme 2016 yılında dünyadaki en profesyonel Alpha Go oyuncusunu yenmiştir. Bu sıra dışı deneyimin başarısının temelinde yapay zekanın 28,6 milyar adet örnek satranç hamlesi verisinin kullanılması vardır. Bu gelişmeler ile yapay zekanın büyük veri ile eğitilmesinin model başarımına doğrudan katkı sağladığı kanıtlanmıştır [9].

Ancak yapay zekânın başarısı için gerekli olan devasa verinin okunması, veri ön işlemlerinin yapılması ve model eğitimi süreçlerinin sürdürülmesi devasa veri depoları ve yüksek kapasiteli işlemciler gerektirir [9]. Verilerin merkezi bir lokasyonda toplanmasının zorlukları ve yüksek donanımsal maliyetlerden dolayı ilerleyen zamanlarda Derin Öğrenme modelleri, Dağıtık donanımsal kaynaklar aracılığıyla uygulanmıştır. Dağıtık Öğrenmenin avantajlarından faydalanılarak yapay zekâ modelleri daha hızlı gelişim imkânı bulmuştur.



Şekil 1. Merkezi, Dağıtık ve FÖ yaklaşımları [10]

Buna karşın, Dağıtık Öğrenme bu avantajları sağlarken veri gizliliğini ihlal etmektedir. Çünkü Dağıtık Öğrenmede, verilerin merkezi bir sunucu tarafından organize edilebilmesi için tüm verinin sunucunun erişimine sunulması gerekmektedir.

İlk olarak 2016 'da Google yapay zekâ ekibi tarafından literatüre kazandırılan FÖ'de ise Merkezi ve Dağıtık Öğrenmeden farklı olarak veri gizliliği ihlal edilmeden bir model eğitim süreci sürdürülmektedir. İşbirlikçi ' sürecine

katılan bir katılımcı, verisini paylaşmazken koordinatör bir sunucu tarafından paylaşılan ortak bir modeli kendi gizli verisi ile kendi kaynaklarını kullanarak eğitir. FÖ konsepti ile eğitilen modeller daha yetkin ve hataya dayanıklıdır. Modeli eğitime süreci, iş birliğine katılan cihazlar veya kuruluşlar üzerinde yapıldığından ağıdaki yükü azaltır. Ayrıca modeli eğitmek için gereken güç tüketimi de geleneksel yaklaşımlardan daha azdır.

FÖ

Şekil 2 'de görüleceği üzere temel FÖ konsepti [11] 4 adımdan oluşur:

1. İşbirlikçiler global modeli indirir.
2. Her işbirlikçi, indirilen global modeli kendi özel verileriyle eğitmesi sonucu model parametreleri güncellenir.
3. İşbirlikçiler, güncellenen model parametrelerini koordinatöre gönderir.
4. Koordinatör, güncellenen parametreleri belirli algoritmalar kullanarak birleştirir.

Bu döngü model yakınsayana kadar devam eder.

FÖ'nün geleneksel yöntemlere göre aşağıdaki gibi bazı avantajları vardır [12]:

Ölçeklenebilirlik: FÖ, model parametrelerinin güncellenmesi aracılığıyla farklı cihazların birbirinden öğrenmesini sağlayarak tüm ağı ölçeklenebilir hale getirir.

Düşük iş hacmi ve yüksek gecikme süresi zorluklarına çözüm: Yerel modeller oluşturmak, tek bir merkezi modeli eğitmeye kıyasla gecikmelerin ve güç tüketiminin azaltılmasına yardımcı olur.

Doğruluğu artırır: FÖ modelleri, birçok yerel modelin bir araya getirilmesi yoluyla eğitildiklerinden ve verilere aynı anda farklı perspektiflerden yaklaştığından, merkezi olarak eğitilen modellerden daha fazla tecrübe paylaşımını sağlar. Böylece model doğruluğuna çoğunlukla olumlu katkıda bulunurlar.

Eğitim süresinde ve eğitim maliyetinde azaltma: Bir modeli merkezi olarak eğitmek yerine, çeşitli yerel modelleri eğitmek ve ardından merkezi global bir model oluşturmak daha az zaman alan bir süreçtir. İş yükü iş birliğindeki katılımcılara dağıtıldığından eğitim maliyeti de daha düşüktür.

Gizliliği ve güvenlik: Eğitim verileri iş birliğine katılan katılımcıdan ayrılmadığından, tüm hassas bilgiler yerelde kalır, böylece kişisel verilerin gizliliği ve güvenliği sağlanır.

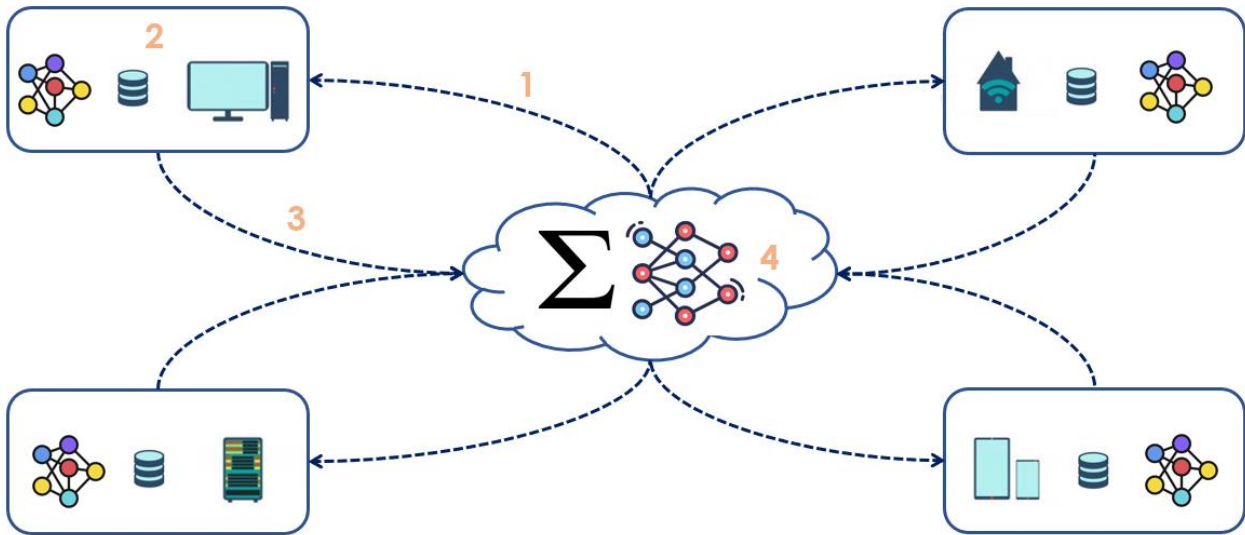
Veri minimizasyonu: FÖ, yalnızca öğrenilen modelin merkezi olarak işlenmesini ve ham verilerin gizli kalmasını sağlayarak veri minimizasyon ilkesini kullanır. Ayrıca gönderilen modeller geçicidir ve global modelle birleştikleri anda boşa çıkarlar.

FÖ'nün Bileşenleri

FÖ konseptinin 3 temel bileşeni vardır.

Katılımcılar

Bir FÖ konseptindeki veri sahipleri ve iş birliğinden faydalanan işbirlikçilerdir [13]. Kullanılacak olan yapay zekâ modeli katılımcılar üzerinde eğitilir. Katılımcıların donanımsal özellikleri [14], konseptte katılan katılımcı sayıları ve iş birliğine katılma kararlılığı [15], katılımcılar üzerindeki verinin dağılımı [11] konseptin başarısına direkt olarak etki eden faktörlerdir ve FÖ'nün zorlukları olarak araştırmaya açıktır.



Şekil 2. FÖ'nün Temel Adımları

Koordinatör

Genellikle güçlü donanımsal özelliklere sahip bir merkezi sunucudur. Sunucunun güvenilirliği konseptin en önemli zorluklarından. Öte yandan Merkeziyetsiz FÖ konseptinde koordinatöre ihtiyaç duyulmaz. Ancak bu konseptte de yüksek iletişim maliyetleri söz konusudur [16].

İşlem ve İletişim Çerçevesi

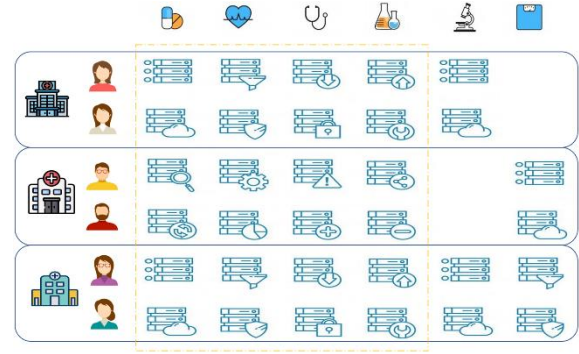
FÖ konseptinde, işlemler katılımcılar ve koordinatör üzerinde gerçekleşirken, iletişim katılımcılar ile koordinatör arasında gerçekleşir. İşlemlerin amacı model eğitimi için, iletişimin amacı katılımcılardan gelen model parametrelerinin birleştirilerek ortak yeni bir model elde edilmesi içindir. En temel ve kullanımı en yaygın olan FedAVG 'dir [7]. Ayrıca FedAVG dışında kullanılan başka model birleştirme stratejileri vardır [17]. FedAVGM, FaultTolerantFedAvg, FedOpt, FedAdagrad, FedAdam ve FedYogi bunlardan bazılarıdır. FedAVGM stratejisi, klasik FedAvg yöntemine sunucu momentumunun eklenmesi ile geliştirilmiştir. FaultTolerantFedAvg ise normal FedAVG'ye ek olarak model birleştirme aşamasına eksik katılım gösteren katılımcıların olması durumunda bu eksikliği tolere ederek o an hazırda var olan katılımcılarla model birleşimini gerçekleştirir. FedOpt, FedAdagrad, FedAdam ve FedYogi stratejileri de model birleşimi aşamasında server tarafındaki adaptif optimizasyon algoritmaları uygulamaktadırlar. Bu alan yeni ve güncel bir araştırma alanıdır [18].

FÖ'nün Sınıflandırılması

FÖ Konseptinde kullanılacak olan yönteme karar verebilmek için işbirlikçilerin öznitelik veya örnek uzayının hangisinde ortak noktalarının olduğunun tespit edilmesi gerekir. Bu açıdan bakınca FÖ'yü veri dağılımı bakımından; Yatay FÖ, Dikey FÖ ve Federe Transfer Öğrenme olmak üzere 3 sınıfa ayırabiliriz [19].

Yatay FÖ

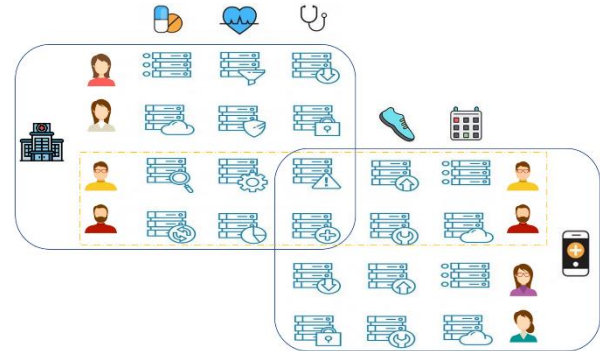
Yatay FÖ, verilerin aynı öznitelik uzayına ancak ayrı örnek uzayına sahip olduğu senaryoda kullanılır. Buna örnek olarak: Farklı şehirlerde konumlanan N adet farklı hastanenin, bireylerin sağlık durumlarını takip etmek için ortak bir model oluşturma niyetinde olduklarını düşünelim. Şekil 3 'te de görüleceği üzere bu durumda hastanelerin hastaları tamamen farklı iken, yapılan tahliller, kullanılan ilaçlar, muayene raporları, kronik rahatsızlıkları gibi bilgiler ortak öznitelikler olacaktır. Böyle bir senaryoda ortak bir model oluşturmak için birinci bölümde bahsedilen merkezi veya dağıtık öğrenme modelleri uygulanabilir. Ancak hasta mahremiyetinin korunması gerekliliği nedeniyle taraflar veri paylaşımından kaçınmaktadır. Böyle bir senaryoda öznitelik uzayının aynı, örnek uzayının farklı olduğu yatay FÖ konsepti kullanılarak hasta mahremiyeti ihlal edilmeden ortak model oluşturulabilir.



Şekil 3. Yatay FÖ'de örnek uzayı ile öznitelik uzayı çakışması

Dikey FÖ

Dikey FÖ, aynı örnek uzayına ancak ayrı öznitelik uzayına sahip olma senaryosunda kullanılır. Buna örnek olarak: Şekil 4 'teki gibi, bir ülkedeki yaygın kurumsal bir hastane ve bu hastaneden bağımsız bir mobil sağlık uygulaması olduğunu varsayalım. Ve aynı anda bu hastanelerden ve mobil sağlık uygulamasından hizmet alan ortak bireyler olduğunu varsayalım. Böyle bir senaryoda dikey FÖ konseptinden faydalanılarak bireylere beslenme programı öneren bir uygulama üretilebilir.



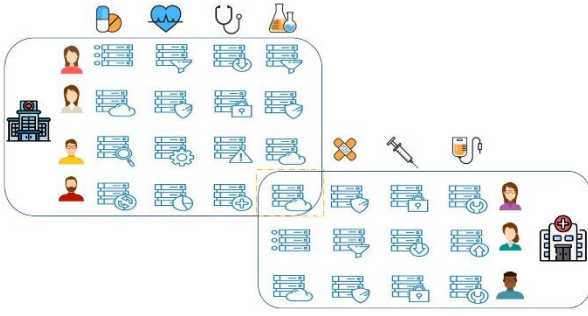
Şekil 4. Dikey FÖ'de örnek uzayı ile öznitelik uzayı çakışması

Federe Transfer Öğrenme

Yatay ve Dikey FÖ'deki senaryoların aksine, çoğu durumda, veriler ne örnek uzayını ne de öznitelik uzayını paylaşır. Transfer öğrenme, bu duruma uygun daha iyi öğrenme sonuçları elde etmek için bir alandaki bilgi birikimini başka bir alana taşımaya sağlar.

Şekil 5'te gösterildiği üzere, bir hastanedeki bazı hastalık tanı ve tedavi bilgileri, Federe Transfer Öğrenme ile diğer hastalıkların teşhisine yardımcı olmak için başka bir hastaneye aktarılabilir. Federe Transfer Öğrenme modeli henüz tam olarak olgunlaşmamıştır, bu nedenle farklı veri yapılarıyla daha esnek hale getirmek için hala bolca araştırma alanı vardır. Veri adaları ve gizlilik koruma sorunları, makine öğreniminin endüstriyel alandaki kullanımında karşılaşılan, önde gelen sorunlardır. Bununla birlikte, Federe Transfer Öğrenme, veri

adalarının engellerini aşarken hem veri güvenliğini hem de kullanıcı gizliliğini korumanın etkili bir yoludur.



Şekil 5. Federe Transfer Öğrenmede örnek uzayı ile öznetelik uzayı çakışması

FÖ'nün Kullanım Alanları

Sağlık Hizmetleri

Tahlil sonuçları, biyomedikal görüntüler, aşı durumu gibi elektronik sağlık kayıtları, makine öğrenimi uygulamaları için sağlık verilerinin ana kaynağı olarak kabul edilir [20]. Makine öğrenimi modelleri yalnızca tek bir hastanede bulunan sınırlı veriler kullanılarak eğitilirse, tahminlerde bir miktar yanlışlık ortaya çıkabilir. Bu nedenle, modelleri daha genellenebilir bir seviyeye getirebilmek için, kuruluşlar arasında veri paylaşımı aracılığıyla veriyi arttırarak yapay zekâ modelinin eğitimini gerçekleştirmek gerekmektedir. Ancak sağlık verilerinin hassas yapısı nedeniyle, hastaların elektronik sağlık kayıtlarının hastaneler arasında paylaşılması mümkün olmayabilir. Bu gibi durumlarda, FÖ, sağlık hizmetleri verileri için işbirlikçi bir öğrenme modeli oluşturmak adına iyi bir seçenek olarak hizmet edebilir. Literatürde sağlık alanında FÖ tabanlı Çok Katmanlı Algılayıcılar [21], Evrişimsel Sinir Ağları [22], Oto Kodlayıcı [23] modelleri ile araştırmalar yapılmıştır.

Nakliye

Araç ağlarında sensörlerin artmasıyla, özellikle de otonom araçların yaygınlaşması ile bu alanda daha fazla veri kullanabilmek ve Makine Öğrenimi modellerini eğitmek mümkün hale gelmiştir. Makine Öğrenimi tabanlı modeller genellikle hem araç yönetimine hem de trafik yönetimine uygulanır [24]. Mevcut otonom sürüş modelleri eğitimin yapıldığı konumun dinamik doğası ile sınırlıdır. FÖ ile farklı coğrafi konulardan çevrimiçi eğitim araçlarıyla daha doğru modeller dizayn edilebilir. Benzer şekilde trafik akışı tahmin teknikleri için de büyük miktarda veri gereklidir, ancak verilerin çoğu çeşitli kuruluşlar arasında bölünmüştür ve gizliliği korumak için değiş tokuş edilemez [25]. Bu tür durumları da ele almak için FÖ yöntemlerini uygulayabiliriz. Literatürde FÖ tabanlı otonom sürüş [26], akıllı ulaşım sistemleri [27] üzerine yapılmış araştırmalar mevcuttur.

Finans

Finansta FÖ'nün en iyi kullanımı, kredi riski değerlendirmesi için bankacılık sektöründedir [28]. Normalde bankalar, merkez bankalarından gelen kredi kartı raporlarını kullanan müşterileri dışlamak için beyaz liste tekniklerini kullanır. Vergilendirme, itibar vb. unsurlar da diğer finans kuruluşları ve e-ticaret şirketleri ile iş birliği yapılarak risk yönetimi için kullanılabilir. Müşterilerin özel bilgilerini kuruluşlar arasında paylaşmak riskli olduğundan, bir risk değerlendirme modeli oluşturmak için FÖ'den yararlanılabilir. Nitekim, müşteri mali durum takibi [29] ve açık bankacılık [30] gibi finansal alanlarda FÖ tabanlı araştırmalar literatürde yer bulmuştur.

Doğal Dil İşleme

Doğal Dil İşleme, makine öğrenimi modelleri üzerine kurulu en yaygın uygulamalardan biri olup, insan dili semantiğini daha iyi anlamamıza yardımcı olur. Ancak, son derece doğru dil modellerini eğitmek için büyük miktarda veri gerekir. Bu veriler cep telefonlarından, tabletlerden ve benzeri ağ erişimi olan elektronik cihazlardan kolaylıkla toplanabilir. Yine, her uç cihazdan gelen metinsel bilgiler kullanıcı bilgilerini içerdiğinden, merkezi dil öğrenme modelleri için gizlilik burada bir darboğaz olarak karşımıza çıkar. Bu kapsamda [31] 'de yazarlar, bir FÖ çerçevesi kullanarak Doğal Dil İşleme modelleri oluşturmanın mümkün olduğunu göstermişlerdir.

Network Saldırı Tespiti

Siber güvenlik konusu dünyada önemi her geçen gün artan alanlardan biridir. Bu alana kurumlar, şirketler ve devletler tarafından yapılan yatırımların miktarı ve her geçen gün daha da artmaktadır. Network saldırı tespiti ismi ile de anılan otomatik siber güvenlik sistemleri çoğunlukla makine öğrenmesi yöntemlerinden faydalanmaktadır [1]. Dünyada her an farklı merkezler hedef alınarak farklı saldırganlar tarafından çok çeşitli saldırı tipleri düzenlenmektedir. Bu durum da her bir merkezin kendi saldırı veri tabanı ile sınırlı bir makine öğrenmesine dayalı network saldırı tespiti yapabildiği ve en etkili yöntemin ancak bu veri tabanlarının birleştirilerek tek bir merkezi network saldırı tespiti veri tabanı üzerinden eğitilecek olan bir model ile korunmaya çalışmasıdır. Oysaki ticari ve stratejik sebeplerle bu tür bir işbirliği mümkün olmamaktadır. FÖ sayesinde çeşitli merkezler verilerini paylaşmadan her bir tekil sistemden daha güçlü bir bağışıklık sistemine sahip ortak bir network saldırı tespiti modeli geliştirebilmektedirler.

Sonuç

Yapay zekanın gelişimi için ihtiyaç duyduğu büyük veri gereksinimi ilerleyen dönemlerde, veri gizliliği ve pahalı donanımsal gereklilikler nedeniyle bir darboğaza girmiştir. FÖ konsepti bu darboğazın aşılması için son

derece etkili çözümler sunmaktadır. 2016 ‘da Google yapay zekâ takımının literatüre kazandırmasıyla ilk temelleri atılan FÖ, dünyadaki araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmüştür. FÖ ile ilgili olarak Sağlık, Nakliye, Finans, Doğal dil işleme gibi birçok alanda araştırmalar yapılmaktadır. Öte yandan, ülkemizde FÖ hak ettiği ilgiyi henüz görmemektedir. Bu bağlamda öncü bir Türkçe kaynak olması amacıyla bu derleme hazırlanmıştır.

Gelecek Çalışmalar

Bu makalede FÖ konseptinin temel çalışma mantığı, hangi problemlere çözümler getirdiği, FÖ konseptinin bileşenleri, FÖ’nün sınıflandırılması ve kullanım alanları ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. FÖ yapay zekânın önünü açmak için son derece etkili bir çözüm olmakla beraber pahalı iletişim, sistem heterojenliği, istatistiksel zorluklar, gizlilik endişeleri ve algoritmik zorluklar gibi birçok geliştirilmeye açık konuları da beraberinde getirmiştir. Önümüzdeki çalışmalarda FÖ’nün gelişime açık alanlarının ve karşılaştığı zorlukların araştırılması planlanmaktadır.

Kaynaklar

- [1] E. Hodo, X. Bellekens, A. Hamilton, C. Tachtatzis, and R. Atkinson, “Shallow and Deep Networks Intrusion Detection System: A Taxonomy and Survey,” pp. 1–43, 2017, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1701.02145>.
- [2] Y. Ma, Z. Wang, H. Yang, and L. Yang, “Artificial intelligence applications in the development of autonomous vehicles: A survey,” *IEEE/CAA J. Autom. Sin.*, vol. 7, no. 2, pp. 315–329, 2020, doi: 10.1109/JAS.2020.1003021.
- [3] J. Bullock, A. Luccioni, K. H. Pham, C. S. N. Lam, and M. Luengo-Oroz, “Mapping the landscape of artificial intelligence applications against COVID-19,” *J. Artif. Intell. Res.*, vol. 69, pp. 807–845, 2020, doi: 10.1613/JAIR.1.12162.
- [4] O. Zawacki-Richter, V. I. Marín, M. Bond, and F. Gouverneur, “Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education-where are the educators?,” doi: 10.1186/s41239-019-0171-0.
- [5] J. Park *et al.*, “Communication-Efficient and Distributed Learning over Wireless Networks: Principles and Applications,” *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 5, pp. 796–819, 2021, doi: 10.1109/JPROC.2021.3055679.
- [6] “I (Legislative acts) REGULATIONS REGULATION (EU) 2016/679 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 April 2016 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data, and repealing Directive 95/46/EC (General Data Protection Regulation) (Text with EEA relevance).”
- [7] H. Brendan McMahan, E. Moore, D. Ramage, S. Hampson, and B. Agüera y Arcas, “Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data,” *Proc. 20th Int. Conf. Artif. Intell. Stat. AISTATS 2017*, vol. 54, 2017.
- [8] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, “ImageNet classification with deep convolutional neural networks,” *Commun. ACM*, vol. 60, no. 6, pp. 84–90, Jun. 2017, doi: 10.1145/3065386.
- [9] Z. Tang, S. Shi, X. Chu, W. Wang, and B. Li, “Communication-Efficient Distributed Deep Learning: A Comprehensive Survey,” no. 1, pp. 1–23, 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2003.06307>.
- [10] E. M. Campos *et al.*, “Evaluating Federated Learning for intrusion detection in Internet of Things: Review and challenges,” *Comput. Networks*, vol. 203, p. 108661, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.COMNET.2021.108661.
- [11] P. Kairouz *et al.*, “Advances and open problems in federated learning,” *arXiv*, pp. 1–105, 2019.
- [12] D. Jatain, V. Singh, and N. Dahiya, “A contemplative perspective on federated machine learning: Taxonomy, threats & vulnerability assessment and challenges,” *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.jksuci.2021.05.016.
- [13] Q. Li *et al.*, “A Survey on Federated Learning Systems: Vision, Hype and Reality for Data Privacy and Protection,” *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, pp. 1–44, 2021, doi: 10.1109/TKDE.2021.3124599.
- [14] S. Wang *et al.*, “Adaptive Federated Learning in Resource Constrained Edge Computing Systems,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 37, no. 6, pp. 1205–1221, 2019, doi: 10.1109/JSAC.2019.2904348.
- [15] V. Smith, C. Chiang, M. Sanjabi, and A. Talwalkar, “Federated Multi-Task Learning,” no. Nips, 2017.
- [16] Q. Li, Z. Wen, and B. He, “Practical federated gradient boosting decision trees,” *AAAI 2020 - 34th AAAI Conf. Artif. Intell.*, pp. 4642–4649, 2020, doi: 10.1609/aaai.v34i04.5895.
- [17] “Flower aggregation algorithms.” <https://flower.dev/docs/>.
- [18] S. Reddi *et al.*, “Adaptive Federated Optimization,” no. 2, pp. 1–38, 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2003.00295>.
- [19] L. Li, Y. Fan, M. Tse, and K. Y. Lin, “A review

- of applications in federated learning,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 149, no. September, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106854.
- [20] M. Ghassemi, T. Naumann, P. Schulam, A. L. Beam, I. Y. Chen, and R. Ranganath, “A Review of Challenges and Opportunities in Machine Learning for Health.,” *AMIA Jt. Summits Transl. Sci. proceedings. AMIA Jt. Summits Transl. Sci.*, vol. 2020, pp. 191–200, 2020, [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32477638> %0Ahttp://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC7233077.
- [21] Q. Dou *et al.*, “ARTICLE Federated deep learning for detecting COVID-19 lung abnormalities in CT: a privacy-preserving multinational validation study,” doi: 10.1038/s41746-021-00431-6.
- [22] X. Li, Y. Gu, N. Dvornek, L. H. Staib, P. Ventola, and J. S. Duncan, “Multi-site fMRI analysis using privacy-preserving federated learning and domain adaptation: ABIDE results,” *Med. Image Anal.*, vol. 65, 2020, doi: 10.1016/j.media.2020.101765.
- [23] L. Huang, A. L. Shea, H. Qian, A. Masurkar, H. Deng, and D. Liu, “Patient clustering improves efficiency of federated machine learning to predict mortality and hospital stay time using distributed electronic medical records,” *J. Biomed. Inform.*, vol. 99, no. September, p. 103291, 2019, doi: 10.1016/j.jbi.2019.103291.
- [24] K. Tan, D. Bremner, J. Le Kerneec, and M. Imran, “Federated Machine Learning in Vehicular Networks: A summary of Recent Applications,” *2020 Int. Conf. UK-China Emerg. Technol. UCET 2020*, no. August, 2020, doi: 10.1109/UCET51115.2020.9205482.
- [25] Y. Liu, J. J. Q. Yu, J. Kang, D. Niyato, and S. Zhang, “Privacy-Preserving Traffic Flow Prediction: A Federated Learning Approach,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 8, pp. 7751–7763, 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2991401.
- [26] A. Nguyen *et al.*, “Deep Federated Learning for Autonomous Driving.” [Online]. Available: <https://github.com/aioz-ai/FADNet>.
- [27] A. M. Elbir, B. Soner, and S. Coleri, “Federated Learning in Vehicular Networks,” pp. 1–6, 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2006.01412>.
- [28] G. Long, T. Shen, Y. Tan, L. Gerrard, A. Clarke, and J. Jiang, “Federated Learning for Privacy-Preserving Open Innovation Future on Digital Health,” *Humanit. Driven AI*, pp. 113–133, 2022, doi: 10.1007/978-3-030-72188-6_6.
- [29] A. Imteaj and M. H. Amini, “Leveraging asynchronous federated learning to predict customers financial distress,” *Intell. Syst. with Appl.*, vol. 14, 2022, doi: 10.1016/j.iswa.2022.200064.
- [30] G. Long, “Federated Learning for Open Banking.”
- [31] D. G. Bernal, “Decentralizing Large-Scale Natural Language Processing with Federated Learning,” *Degree Proj. Comput. Sci. Eng.*, 2020, [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1455825>.



Montmorillonite nanokil ilave edilmiş düşük yoğunluklu polietilen/polistiren/stiren bütadien stiren polimer kompozitinin fiziksel ve aşınma özelliklerinin incelenmesi

Investigation of physical and wear properties of montmorillonite nanoclay added low density polyethylene/polystyrene/styrene butadiene styrene polymer composite

Gizem Karadirek¹, Çağla Ceren Aydın², Münir Taşdemir^{3*}

¹ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, İstanbul, 34722, Türkiye, gkaradirek14@gmail.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0272-5825>

² Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, İstanbul, 34722, Türkiye, caglacerenaydin@gmail.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2585-9458>

³ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, İstanbul, 34722, Türkiye, munir@marmara.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8635-7251>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 26 Ocak 2022
Revizyon 20 Mayıs 2022
Kabul 20 Mayıs 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar kelimeler

*Düşük yoğunluklu polietilen,
polistiren, montmorillonite nano kil,
fiziksel özellikler, aşınma.*

ÖZ

Bu çalışmada; düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) içerisine farklı oranlarda polistiren (PS), stiren etilen bütadien stiren termoplastik blok kopolimeri (SBS) ve montmorillonite nanokil katarak bir polimer kompoziti üretilmiştir. Tüm malzemeler çift vidalı ekstrüzyon makinesinde karıştırılarak altı farklı polimer kompoziti üretilmiştir. Daha sonra elde edilen bu polimer kompozitlerinden enjeksiyon kalıplama yöntemi ile kalıplama yapılarak standart test numuneleri basılmıştır. Elde edilen polimer kompozit malzemelerin çeşitli fiziksel ve aşınma özellikleri hakkında bilgi edinmek için; Vicat yumuşama sıcaklığı, nem emme oranı, erime akış indeksi (MFI), ısıl çarpılma sıcaklığı (HDT), sürtünme katsayısı, yoğunluk ve aşınma testleri yapılmıştır. Ayrıca darbe testi numunelerinin kırık yüzeylerinden taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ile mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Yapılan testler sonucunda düşük yoğunluklu polietilen içerisine katılan; PS, SBS ve nano kil oranlarının değişimi ile polimer kompozitinin fiziksel ve aşınma değerlerinde önemli değişimlerin olduğu tespit edilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 January 2022
Received in revised form 20 May 2022
Accepted 20 May 2022
Available online 28 June 2022

Keywords

Low density polyethylene,
polystyrene, montmorillonite nano
clay, physical properties, wear.

ABSTRACT

In this study; a polymer composite was produced by adding different proportions of polystyrene (PS), styrene ethylene butadiene styrene thermoplastic block copolymer (SBS) and montmorillonite nanoclay into low density polyethylene (LDPE). Six different polymer composites were produced by mixing all materials in a twin screw extruder. Later, standard test samples were molded from the obtained polymer composites by injection molding method. To learn about the various physical and wear properties of polymer composite materials obtained; Vicat softening temperature, moisture content, melt flow index (MFI), thermal deflection temperature (HDT), friction coefficient, density and wear tests were performed. In addition, in order to see the distribution of montmorillonite in the polymer matrix, microstructure photographs were taken with scanning electron microscopy (SEM) by using fracture surfaces of impact test samples. According to the results obtained from the tests carried out, which are included in low density polyethylene matrix; It has been determined that there are significant changes in the physical and abrasion values of the polymer composite with the change of PS, SBS and nano clay ratios.

Doi: 10.24012/dumf.1062412

* Sorumlu Yazar

Giriş

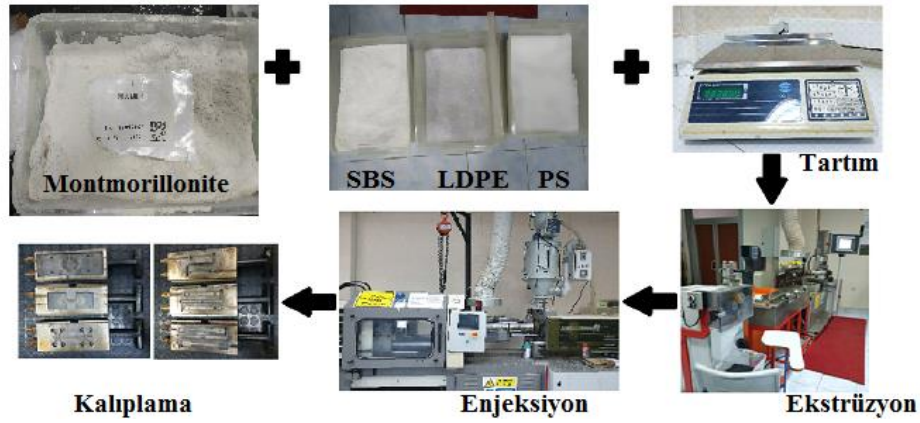
Son yıllarda doğal kaynakların azalması ile birlikte, bu kaynakların uygun şekilde kullanılması zorunlu hale getirmiştir. Bununla paralel şekilde zaman kazanmak için daha hızlı çalışan cihazların üretilmesi, daha uzun süre kullanılması ve bunların yanı sıra daha ucuz üretim gibi etkenler de bu çalışmalara hız kazandırmıştır. Bundan ötürü kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve kullanımı ön plana çıkmaktadır. Kompozit yapılar sayesinde daha hafif, daha az enerji tüketen, daha ekonomik ve daha yüksek performanslı yapılar oluşturulmaktadır. Bugün inşaat sektöründe, uzay sanayisinde, spor gereçlerinde müzik aletlerinde, denizcilikte ve otomotiv sektörü gibi yerlerde bu malzemelerin kullanımı artmaktadır [1]. Kompozit malzemeler doğal veya sentetik iki veya daha fazla bileşenin bir araya getirilmesi ile oluşturulan malzeme grubudur [2]. Birbirinden farklı en az malzemenin birleşimi ile oluşan kompozit malzemeler, matris malzemesi ve bu matris malzemesinin performansını artırmak için katılan takviye malzemelerinden oluşmaktadır. Kompozit malzemeler matris malzemesi türüne ve takviye malzemesi türüne göre ikiye ayrılmaktadır [3]. Polimerik malzemeler; özelliklerinin makina tasarımına uyumu, ağırlığa oranla dayanımlarının yüksek olması ve istenilen birçok özelliğin kolay kazandırılması nedenleri ile bazı metallerin yerine de kullanılmaktadır. Hızlı gelişme içinde olan polimerik malzemelerin çeşitliliği arttıkça günlük hayatta makina tasarımlarında, uzay ve havacılık alanlarında kullanımları da artmaktadır [4]. Günümüzde çok farklı polimer matrisli kompozit malzemeler değişik uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle nanokil ilaveli polimer matrisli kompozit malzemeler; maliyetinin düşük olması ve kolay elde edilmeleri nedeniyle daha çok tercih edilmektedirler [5-8]. Dünyada çoğu ülke nanoteknoloji konusuna ciddi ölçüde yatırımlar yapmaktadırlar. Son on yıldır nanometre ölçekli bilim ve teknolojiye ilgi her geçen gün artmaktadır. Tüm dünyada devlet enstitüleri, kamusal araştırma merkezleri, üniversiteler ve firmalar bu yönde büyük yatırımlarda bulunmaktadır [9-12]. Polimerik nanokompozitler çoğunlukla % 1-3 oranında nanopartikül içermektedir. Bu yapılar tek bileşen ve tek faz gibi davranan malzemelerdir. Polimerik nanokompozitler; saydamlık, düşük yoğunluk, yanıcılığı azaltma, düşük geçirgenlik ve mekanik özelliklerinin gelişimi gibi özellikler içerirler [9]. Polimer-kil nanokompozitler, 2000'li yıllarında önemi anlaşılmış olup, en yeni kompozit türlerinden birini oluşturmaktadır. Bu tür kompozitlerde dağıtıcı faz olarak polimer kullanılır. Killer destek maddesi görevini üstlenirler. Bu tip kompozit malzemeler, sanayide ve günlük hayatta polimerlerin kullanıldığı her alanda kullanılabilir [13]. Bu konuda akademik çalışmalar da mevcuttur. Örneğin, Gümüş bir çalışmada cam küre ve nanokil katkılı yüksek yoğunluklu polietilen polimer kompozitlerinin mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada elde ettiği kompozitin yoğunluğunun montmorillonite kil eklendikçe düştüğünü tespit etmiştir [14]. Jianying Yu vd SBS içerisine sodyum montmorillonit (Na-MMT) ve organofilik montmorillonit (OMMT) katarak bir polimer kompoziti elde etmişlerdir. Çalışmalarında elde ettikleri sonuçlarına göre OMMT'li

yapıların pul pul dökülen yapılar oluşturduğunu, Na-MMT'li yapıların ise daha iyi yapışma sağladığını belirlemişlerdir [15]. Başka bir çalışmada Samariha vd yüksek yoğunluklu polietilen içerisine nanokil ve küspe tozu katarak bir polimer kompoziti elde etmiş ve özelliklerini incelemişlerdir. Nano kil oranının artmasıyla çekme mukavemeti ve modülünün arttığını belirlemişlerdir [16]. Bir diğer çalışmada Venkatesan vd yüksek yoğunluklu polietilen içerisine değişik türlerde nano kil katarak bir polimer kompoziti elde etmişlerdir. Kil miktarının artmasıyla çekme mukavemeti ve sertlik değerlerinde artışın olduğunu buna karşılık darbe mukavemeti değerinde ise düşüşün olduğunu tespit etmişlerdir [17]. Adin vd yapmış oldukları bir çalışmada farklı oranlarda alüminyum, mika ve seramik parçacıklarını epoksi reçinesine katarak bir polimer kompoziti elde etmişlerdir. Bu farklı türde parçacıkların oranının artmasıyla elde edilen polimer kompozitinin çekme ve eğilme yüklerinde arttığını belirlemişlerdir. Çekme mukavemetindeki en yüksek artış ağırlıkça %4 alüminyum ile elde edilmiş numunelerde, eğime mukavemetindeki en büyük artışın ise %2 alüminyum ile elde edilmiş numunelerde olduğunu tespit etmişlerdir [17]. Başka bir çalışmada Saraç vd Al_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2 nano partiküllerini epoksi ile karıştırıp bir polimer kompoziti elde etmişler partiküllerin oranının ve türünün değişmesiyle statik ve yorulma davranışlarının incelemişlerdir [18]. Bu çalışmada nanokil olarak montmorillonite kullanılmıştır. Buradaki amaç kompozitteki montmorillonite nanokil miktarının LDPE/PS/SBS polimer karışımının yoğunluk, sürtünme katsayısı, ısıl çarpılma sıcaklığı, vicat yumuşama sıcaklığı, nem emme miktarı ve aşınma özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır.

Materyal ve metot

Kompozisyon ve malzemeler: Düşük yoğunluklu polietilen içerisine katılan polistiren, stiren bütadien stiren ve nanokil oranları değiştirilerek altı farklı grup elde edilmiştir. Hazırlanan LDPE/PS/SBS/nanokil polimer kompozitinin karışım oranları Tablo 1' de verilmiştir. Kullanılan düşük yoğunluklu polietilen H2-8 kodlu Petkim tarafından üretilen polimerdir. Yoğunluğu $0,918-0,922 \text{ g/cm}^3$ tür. Erime akış hızı ($2,16 \text{ kg}-190 \text{ }^\circ\text{C}$) $1,7-3,0 \text{ g/10 dak.}$ arasındadır. Vicat yumuşama sıcaklığı $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ve akma gerilme dayanımı ise 80 kg/cm^2 dir. Kullanılan nanokil yüzey modifiyeli kil (onium ion modifiyeli montmorillonite kil) ağırlıkça % 55-65 montmorillonite kil ve % 35-45 dimethyl dialkyl (C14-18) ammonium' dan ibarettir. Bu kilin yüzey alanı firma ürün katalogunda belirtildiği üzere $220-270 \text{ m}^2/\text{g}$ aralığındadır. Stiren bütadien stiren (SBS) ise LLC (USA) tarafından üretilen Kraton D-1184 kodlu üründür. Yoğunluğu $0,938 \text{ g/cm}^3$ ve stiren oranı ise %30' dur.

Numune Hazırlama: Düşük yoğunluklu polietilen, polistiren, stiren etilen bütadien stiren termoplastik blok kopolimeri ve montmorillonite nano kili, Yamato ADP-31 tipi fırın içerisinde $105 \text{ }^\circ\text{C}$ ' de 8 saat boyunca kurutulmuştur. Şekil 1' de bu deneysel çalışmanın aşamaları verilmiştir.



Şekil 1. LDPE/PS/SBS/Montmorillonite nanokil polimer kompozitinin deneysel çalışma aşamaları

Kurutma işlemi sonrasında nanokil tozları ve düşük yoğunluklu polietilen-polistiren-SBS granülleri Patterson marka karıştırıcıda yirmi dakika süresince fiziksel olarak karıştırılmıştır. Literatür incelemesi sonucu bu sürenin uygun bir süre olduğu görülmüştür. Bir sonraki aşamada ise Mikrosan marka çift vidalı ekstrüderde 25-30 bar basınç altında, 25 dev/dak vida dönüş hızı ve 180-210 °C arasında bulunan sıcaklıklarda eritilerek karışımları gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. LDPE/PS/SBS/Montmorillonite nanokil polimer kompozitinin karışım oranları (ağırlıkça)

Gruplar	LDPE (%)	PS (%)	SBS (%)	Montmorillonite nanokil
1	100	-	-	
2	50	50	-	-
3	45	45	10	-
4	40,5	40,5	9	10
5	36	36	8	20
6	31,5	31,5	7	30

Buradan çıkan granüller enjeksiyonla kalıplama öncesinde tekrar kurutma fırınında 24 saat boyunca 105°C'de kurutulmuşlardır. Son olarak enjeksiyon makinesinde standart test numuneleri basılmıştır. Tablo 2'de ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama parametreleri verilmiştir.

Tablo 2. LDPE/PS/SBS/Montmorillonite Nanokil polimer kompozitinin Ekstrüzyon ve Enjeksiyon Kalıplama Parametreleri

İşlem	Ekstrüzyon	Enjeksiyon
Sıcaklık (°C)	180–210	180–210
Basınç (bar)	25-30	100–110
Kalıpta bek. sür.(sn)	-	15
Vida hızı (dev/dak)	25	25
Kalıp sıcaklığı (°C)	-	35-40

Karakterizasyon

Elde edilen gruplardan testler için beş adet numune alınmıştır ve ortalamaları verilmiştir. Isıl çarpılma sıcaklığı

(HDT) testi ISO 75' e göre ve Vicat yumuşama sıcaklığı ise ISO 307' e göre Ceast marka test cihazı ile yapılmıştır. Numunelere uygulanan yük aşağıdaki denklem (1) ile belirlenmiştir.

$$F=2.\sigma.b.h^2/3L \quad (1)$$

Burada, σ : Eğilme mukavemeti (MPa), b: Numune genişliği (mm), h: Numune kalınlığı (mm), L: Mesnetler arası mesafe (mm), F: Numuneye uygulanan kuvvet (N)' dir. Bu formüle göre değerler yerine konulduğunda numune üzerine 3 Newton yük uygulanmıştır.

Vicat testi metod A' ya göre yapılmıştır. Burada kullanılan numunelerin boyutu 20x20x4mm olarak alınmıştır.

Erime akış indeksi (MFI) testi ISO 1133 standardına göre Zwick 4100 marka cihaz ile yapılmıştır. Belirli bir süre sonunda akan malzeme tartılmış ve aşağıdaki denklem (2)'de değerler yerine konularak MFI değeri belirlenmiştir. Burada, m: Belirli sürede (T) akan toplam numune ağırlığı (gr) ve t: Belirli süre (sn)' dir.

$$MFI=m.600/t \quad (2)$$

Nem ölçüm tetleri ASTM D6980' e göre Kern marka nem ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Burada kullanılan numune boyutlarının ölçüleri 10x10x4 mm' dir.

Aşınma testleri DIN 53 516 standardına göre Devotrans DA5 marka tambur tipi aşınma test cihazında yapılmıştır. Bu test için numunelerin kalınlığı 7 mm ve çapları ise 15,5 mm alınmıştır. Tamburun dönüş hızı dakikada 40 devir olarak alınmıştır. Numunelere uygulanan yük (F_N) 10 N ve aşındırma mesafeleri (L) ise 20-40-60 ve 80 metre olacak şekilde uygulanmıştır. Aşınma sonucunda meydana gelen ağırlık kaybının bulunması için deneyden önceki ve deneyden sonraki numunenin ağırlıkları 0,0001 gr hassasiyetindeki terazi ile ölçülmüş deney öncesi ağırlıktan (M_1) deney sonrası ağırlık (M_2) çıkarılarak ağırlık kaybı (Δm) aşağıda verilen denklem (3) ile hesaplanmıştır.

$$\Delta m=M_1-M_2 \quad (3)$$

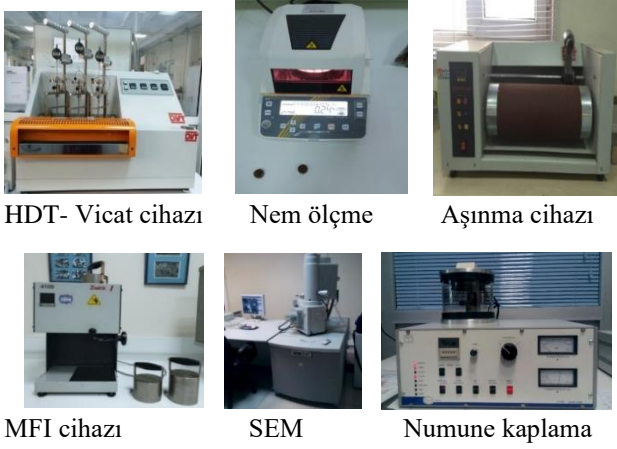
Numunelerin ağırlık kaybı aşındırma işleme sonrasında ölçülerek aşınma oranları ise (W_r) aşağıda verilen denklem (4) ile hesaplanmıştır.

$$W_r=\Delta m/\rho.F_N.L \quad (4)$$

Bu formülde Δm : Ağırlık kaybı, ρ : Yoğunluk, F_N : Uygulanan yük ve L: Aşındırma mesafesini temsil etmektedir. Aşınma oranlarının belirlenmesinde 3 adet numune test edilmiş ve aritmetik ortalamalar verilmiştir.

Darbe numunelerinden elde edilen kırık yüzeyler Polaron marka kaplama cihazında altın/paladyum alaşımı ile

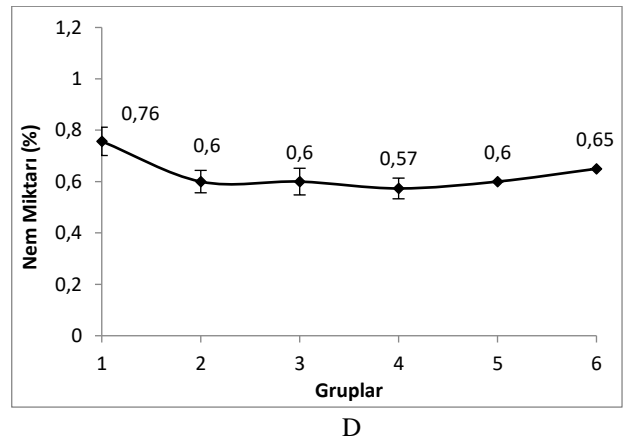
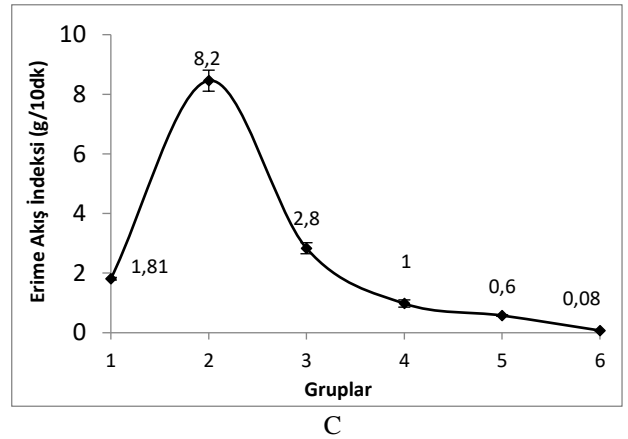
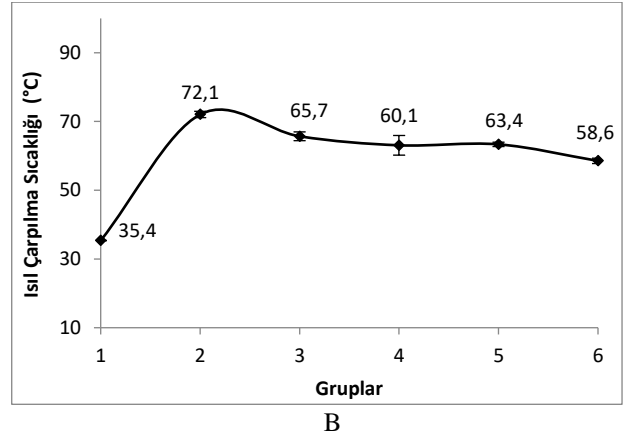
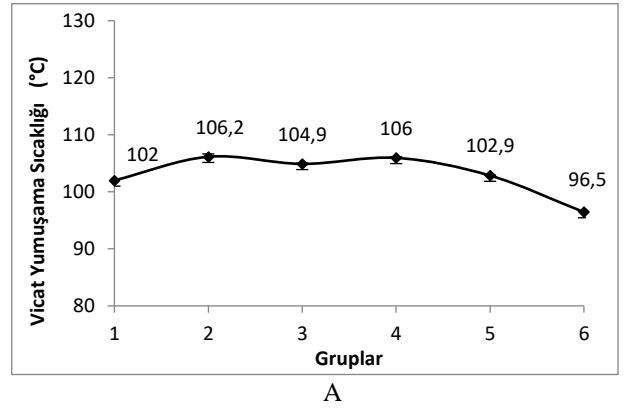
kaplanmıştır. 10 nm kalınlığındaki bu kaplama elektriksel yüklemeyi önlemek için yapılmıştır. Daha sonra numuneler 10 kV altında Jeol marka taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Şekil 2' de bu çalışmada kullanılan test cihazları verilmiştir.



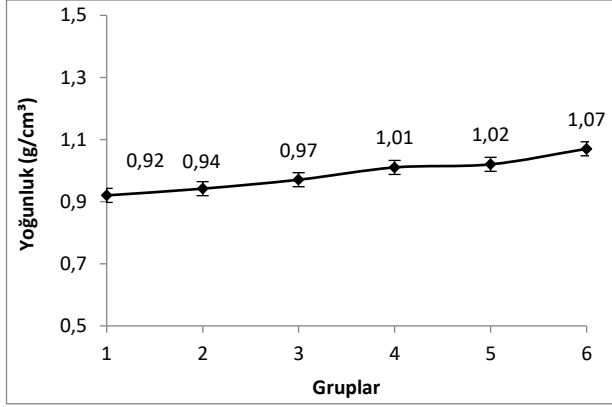
Şekil 2. LDPE/PS/SBS/Montmorillonit nanokil polimer kompozitinin özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan test cihazları

Araştırma Sonuçları

Düşük yoğunluklu polietilene katılan; polistiren, stiren etilen bütadien stiren termoplastik blok kopolimeri ve montmorillonit nanokil ilavesiyle oluşturan polimer kompozitinin fiziksel değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 3' de verilmiştir. Şekil 3A'ya bakıldığında düşük yoğunluklu polietilen içerisine %50 oranında polistiren ilavesi ile Vicat yumuşama sıcaklık değerinin arttığı görülmektedir. Daha sonra karışıma %10 oranında SBS' nin ilavesiyle bu değerde bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. Karışım içerisine %10 montmorillonit nanokilin ilavesi ile Vicat yumuşama sıcaklık değeri artmış, fakat Nanokil yüzdesi %20 ve %30'a çıkarıldığında Vicat yumuşama sıcaklığı değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Gümüş [20] yapmış olduğu bir çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen içerisine cam küre ve montmorillonit katmıştır. Elde ettiği polimer kompoziti içerisinde kil miktarının artmasıyla Vicat yumuşama sıcaklığı değerlerinin de düştüğünü belirlemiştir. Taşdemir vd [7] bir çalışmada polipropilen içerisine kil ve $Mg(OH)_2$ katıp süper kritik şartlarda CO_2 gazı emdirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda kil miktarının artışıyla Vicat yumuşama değerinde azalmanın olduğunu belirlemişlerdir.



Şekil 3. LDPE/PS/SBS/Montmorillonit nanokil polimer kompozitinin fiziksel özellikleri



Şekil 4. LDPE/PS/SBS/Montmorillonit nanokil polimer kompozitinin yoğunluk değerleri

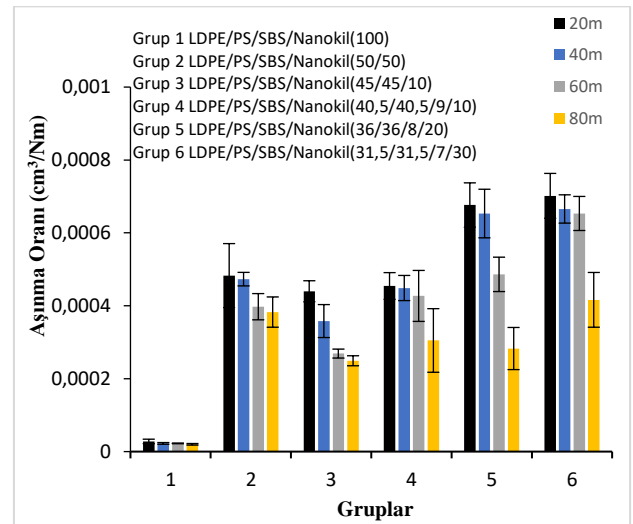
Şekil 3B incelendiğinde saf düşük yoğunluklu polietilenin ısı çarpılma sıcaklığının $35,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu görülmektedir. Karışım içerisine polistirenin eklenmesiyle bu değer $\%36,7$ oranında artarak $72,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye çıktığı anlaşılmaktadır. Karışıma $\%10$ SBS ilavesiyle bu değerde azalmaya sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. Karışım içerisine montmorillonit nanokil ilavesi HDT değerlerinin daha da düşmesine sebebiyet vermiştir. Fakat yine de saf LDPE'nin HDT değerinden yüksek değerler vermiştir. Gümüş [20] yapmış olduğu bir çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen içerisine cam küre ve montmorillonit katmıştır. Elde ettiği polimer kompoziti içerisinde kil miktarının artmasıyla ısı çarpılma sıcaklığı değerlerinin de düştüğünü belirlemiştir. Taşdemir vd [7] bir çalışmasında polipropilen içerisine kil ve $\text{Mg}(\text{OH})_2$ katıp süper kritik şartlarda CO_2 gazı emdirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda kil miktarının artışıyla ısı çarpılma sıcaklığı değerinde azalmanın olduğunu belirlemişlerdir.

Şekil 3C incelendiğinde saf düşük yoğunluklu polietilenin erime akış indeksi (MFI) değerinin $1,81\text{ g}/10\text{ dk}$ olduğu ve Polistiren ilavesiyle bu değer $8,2\text{ g}/10\text{ dk}$ 'ya çıktığı görülmektedir. $\%10$ miktarda uyumlaştırıcı malzeme olarak eklenen SBS ile erime akış indeksi değerinin düşerek $2,8\text{ g}/10\text{ dk}$ olduğu görülmektedir. Dolayısıyla sisteme SBS ilavesi erime akış indeksi değerini düşürmekte olduğu anlaşılmaktadır. Karışıma nanokil ilavesi ile bu düşüşün sürdüğü şekilde anlaşılmaktadır. $\%10$ nanokil ilaveli 4. Grubun MFI değerinin $1\text{ g}/10\text{ dk}$ olduğu ve $\%30$ nanokil ilaveli 6. Grupta ise bu değer $0,08\text{ g}/10\text{ dk}$ 'ya kadar düştüğü görülmektedir. Sonuç olarak karışıma katılan SBS ve nanokil erime akış indeksinin önemli seviyede düşüşüne sebebiyet vermişlerdir. Gümüş, B. [20] yapmış olduğu bir çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen içerisine cam küre ve montmorillonit katmıştır. Elde ettiği polimer kompoziti içerisinde kil miktarının artmasıyla erime akış indeksi değerlerinin de düştüğünü belirlemiştir. Taşdemir vd [7] bir çalışmasında polipropilen içerisine kil ve $\text{Mg}(\text{OH})_2$ katıp süper kritik şartlarda CO_2 gazı emdirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda kil miktarının artışıyla erime akış indeksi değerinde azalmanın olduğunu belirlemişlerdir.

Şekil 3D' de karışımın nem emme davranışlarını veren grafik görülmektedir. Grafik incelendiğinde saf düşük

yoğunluklu polietilenin nem emme miktarının $\%0,76$ seviyelerinde olduğu görülmektedir. Polietilen içerisine polistirenin ilavesi nem emme miktarını bir miktar düşürmüş ve $\%0,6$ seviyelerine indirmiştir. 3. Gruptaki SBS ilavesi nem emme değerinde bir değişikliğe sebebiyet vermemiştir. Fakat $\%30$ nanokil ilavesi ile bu değerde az da olsa bir artışa sebebiyet vermiştir. Gümüş [20] yapmış olduğu bir çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen içerisine cam küre ve montmorillonit katmıştır. Elde ettiği polimer kompoziti içerisinde kil miktarının artmasıyla nem emme değerlerinin yükseldiğini belirlemiştir.

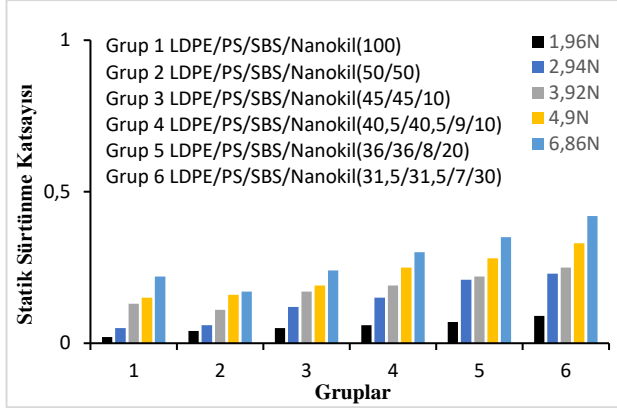
Şekil 4 incelendiğinde saf düşük yoğunluklu polietilenin yoğunluğunun $0,92\text{ g}/\text{cm}^3$ olduğu görülmektedir. Polietilen içerisine ikinci grupta eklenen polistiren ile birlikte yoğunluk değerinin bir miktar artarak $0,94\text{ g}/\text{cm}^3$ değerine geldiği görülmektedir. Bu değerdeki artış polistirenin daha yoğun bir malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. Daha sonra karışıma eklene SBS ve nano kil ilavesiyle yoğunluk değerinin $1,07\text{ g}/\text{cm}^3$ lere kadar çıktığı görülmektedir. Bu çıkışın sebebi nanokilin yoğunluğunun polietilenden fazla olmasından kaynaklanmaktadır. LDPE/PS/SBS/Nanokil polimer kompozitinin aşınmaya karşı gösterdiği davranışları incelemek üzere 10 N yük altında $0,32\text{ m}/\text{s}$ hızla dönen zımparalı (#60) tambur üzerinde bütün grupların numuneleri $20\text{ m}-40\text{ m}-60\text{ m}-80\text{ m}$ aşındırılmışlardır. Denklem (1) kullanılarak değerler formülde yerine yazılmış ve aşınma oranları hesaplanmıştır. Şekil 5 incelendiğinde LDPE/PS/SBS/Montmorillonit nanokil polimer kompozitinde aşındırma mesafesinin artışıyla birlikte aşınma oranı değerlerinde düşüşün olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık LDPE matris içerisine polistiren ve kalsit oranının artmasıyla da aşınma oranı değerlerinde artış tespit edilmiştir. Kaştan vd PA₆/HDPE polimer karışımına nano kil katarak kompozitin aşınma oranlarındaki değişimleri incelemişlerdir. Yük miktarının artmasıyla aşınma oranı değerlerinin azaldığını fakat nano kil oranının artmasıyla bu değerlerin bir miktar arttığını belirlemişlerdir [21].



Şekil 5. LDPE/PS/SBS/Montmorillonit nanokil polimer kompozitinin aşınma oranları

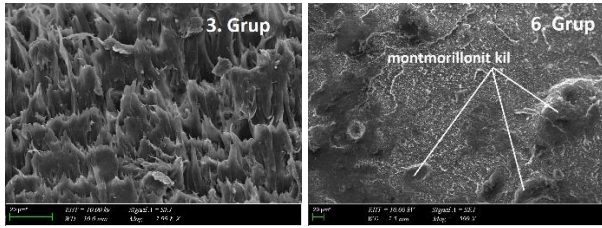
Şekil 6'da LDPE/PS/SBS/Montmorillonit nanokil polimer kompozitinin statik sürtünme katsayı değerleri verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde LDPE/PS/SBS/Montmorillonit

nanokil polimer kompozitinde 1,96-2,94-3,92-4,9 ve 6,86 N yük ile yapılan testlerde, yükün artışıyla birlikte sürtünme katsayısı değerlerinde de artış olduğu gözlemlenmiştir. Diğer taraftan kompozit içerisinde kalsit oranının artmasıyla da statik sürtünme katsayısı değerlerinde de artış tespit edilmiştir. Kaştan vd PA₆/HDPE polimer karışımına nano kil katarak kompozitin sürtünme katsayılarındaki değişimleri incelemişlerdir. Nano kil oranının artmasıyla sürtünme katsayısı değerlerinde bir artışın olduğunu belirlemişlerdir [21].



Şekil 6. LDPE/PS/SBS/Montmorillonit nanokil polimer kompozitinin statik sürtünme katsayıları

LDPE/PS/SBS/Nanokil polimer kompozitinin mikroyapı fotoğrafları Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. LDPE/PS/SBS/Montmorillonit nanokil polimer kompozitinin SEM fotoğrafları

Buradaki diğer amaçlar doğada bol miktarda bulunan kilin polimerde dolgu maddesi olarak kullanımı ile daha az polimer tüketimi ve elde edilen polimer kompozitinden çeşitli bahçe mobilyası üretilebilirliği için.

Sonuç

Bu çalışmada düşük yoğunluklu polietilen polimerine farklı oranlarda polistiren, stiren bütadien stiren termoplastik blok kopolimeri ve nanokil eklenmiştir. Elde edilen polimer kompozitinin vicat yumuşama sıcaklığı, ısı çarpılma sıcaklığı, erime akış indeksi, nem emme miktarı ve yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Bunlara ek olarak statik sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve mikroyapı görüntüleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

1) Düşük yoğunluklu polietilen içerisine farklı oranlarda eklenen polistiren, SBS ve nanokil ilavesi ile ısı çarpılma sıcaklığı ve vicat yumuşama sıcaklığı

değerlerinde önce bir miktar artış daha sonra ise düşüş tespit edilmiştir.

- 2) Düşük yoğunluklu polietilen içerisine eklenen polistiren ile erime akış indeksi artmış daha sonra SBS ve nanokil ilavesiyle bu değerde düşüş görülmüştür.
- 3) Düşük yoğunluklu polietilen içerisine farklı oranlarda eklenen polistiren, SBS, nanokil ilavesi ile elde edilen kompozitlerin nem emme miktarında düşüş görülmüştür. Fakat artan nanokil miktarıyla bu değerlerin arttığı anlaşılmaktadır.
- 4) Düşük yoğunluklu polietilen içerisine farklı oranlarda eklenen polistiren, SBS ve nanokil ilavesi ile 20-40-60-80m mesafede yapılan aşınma testlerinde aşınma oranının düştüğü buna karşılık nanokil ilavesi ile bu değerlerin nispeten arttığı tespit edilmiştir.
- 5) Düşük yoğunluklu polietilen içerisine farklı oranlarda eklenen polistiren, SBS ve nanokil ilavesi ile 1,96-2,94-3,92-4,9 ve 6,86 N yük ile yapılan statik sürtünme katsayısı belirleme testlerinde, yükün artışıyla statik sürtünme katsayısı değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir. Özellikle nanokil ilaveli gruplarda bu değerlerin daha da arttığı belirlenmiştir.
- 6) SEM görüntülerinde de anlaşıldığı gibi nano kil matris içerisinde homojen olarak dağılmıştır.

Kaynaklar

- [1] S. Doğanay, Y. Ulçay, “Farklı oranlarda takviye edilmiş cam lifi polyester kompozitlerin deniz suyu etkisi altında yorulma davranışının incelenmesi” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 12, Sayı 2, sayfa 85-95, 2007.
- [2] S. Sabancı, “Fiber takviyeli polimer matriksli kompozitlerin enjeksiyon yöntemi ile üretimi” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2005.
- [3] H. Akbulut, “Alümina fiber takviyeli al-si metal matriksli kompozitlerin üretimi ve mikroyapı özellik ilişkilerinin incelenmesi” Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1995.
- [4] Ö.T. Savaşçı, N. Uyanık, “Plastikler ve plastik teknolojisi”, Çanay Kitabevi, İstanbul, 1998.
- [5] N. Bala, İ. Kamaruddin, M. Napiyah, M.H. Sutanto, “Polymer nanocomposite. Modified asphalt: characterisation and optimisation using response surface methodology”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 4233–4243, 2019.
- [6] J. Oner, “Examination of storage stability behaviour of polymer modified bitumen involving nanoclay”, *Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture EJCAR*, 3, 49-55, 2019.
- [7] M. Taşdemir, G.T. Caneba, R. Tiwari, B. Wang, “Characterization of PP/Mg(OH)₂ and PP/nanoclay composites with supercritical CO₂ (scCO₂)”, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 50(10), 1064-1070, 2011.
- [8] M. Tasdemir, S. Ersoy, “Mechanical, morphological and thermal properties of HDPE polymer composites filled with talc, calcium carbonate and glass spheres”, *Romanian Journal of Materials*, 45(2), 147-154, 2015.

- [9] S. Çıracı, E. Özbay, O. Gülseren, H.V. Demir, M. Bayındır, A. Oral, T. Senger, A. Aydın, A. Dana, "Türkiye’de nanoteknoloji", *Bilim ve Teknik Dergisi*, Ağustos Sayısı, 4-23, 2005.
- [10] Y. Saçaklı, "Değişik partikül boyutlarındaki Mg(OH)₂ katkılı polipropilen (PP) nanokompozitinin özelliklerinin incelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, 2011.
- [11] M. Salerno, P. Landoni, R., Verganti, "Designing foresight studies for nanoscience and nanotechnology future developments", *Technological Forecasting & Social Change*, 75:1202-1223, 2008.
- [12] E. Erdoğan, "Fonksiyonel nano malzemelerin sentezi", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, 2011.
- [13] <https://dspace.ankara.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12575/68460/5958.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [14] B.E. Gümüş, "Cam küre ve nanokil katkılı yüksek yoğunluklu polietilen polimer kompozitlerinin mekanik özellikleri", *13. Kimya Mühendisliği Kongresi*, Van, Türkiye, 03 Eylül 2018, ss. 20-28, 2018.
- [15] J. Yu, L. Wang, S. Wu, B. Li, "Effect of montmorillonite on properties of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumen", *Polymer Engineering and science*, 47(9), 1280-1295, 2007.
- [16] A. Samariha, A.H. Hemmasi, I. Ghasemi, B. Bazyar, M. Nematı, "Effect of nanoclay contents on properties, of bagasse flour/reprocessed high density polyethylene/nanoclay composites, Maderas" *Ciencia y tecnología* 17(3): 637 – 646, 2015.
- [17] N. Venkatesan, G.B. Bhaskar, "Study on mechanical testing of various nanoclay reinforced with high density polyethylene nanocomposites", *International Journal of Applied Engineering Research* 16(3), 220-227, 2021.
- [18] H. Adin, M.Ş..Adin, 'Effect of particles on tensile and bending properties of jute epoxy composites' *Materials Testing*, 64 (3), 401-411, 2022.
- [19] İ. Saraç, H. Adin, Ş. Temiz,' Experimental determination of the static and fatigue strength of the adhesive joints bonded by epoxy adhesive including different particles' *Composites Part B: Engineering*, 155, 92-103, 2018.
- [20] B.E. Gümüş, "Effect of montmorillonite clay on physical properties of HDPE/ HGS composites", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21, 735-744, 2021.
- [21] A. Kaştan, Y. Yalçın, H. Ünal, "Wear behavior of polyamide 6/high density polyethylene/nanoclay composites", *Romanian Journal of Materials*, 47(2), 237-243, 2017.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Taşdemir: Veri toplama, Verilerin analizi ve yorumlanması, Taslağın oluşturulması

Karadirek: Veri toplama, Verilerin analizi ve yorumlanması, Taslağın oluşturulması

Aydın: Veri toplama, Verilerin analizi ve yorumlanması, Taslağın oluşturulması



DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 kapsamında betonarme çerçeve ve saplama/ikincil kirişlerin kesit tesirlerindeki değişimin karşılaştırılması

Comparison of cross-sectional effects of reinforced concrete frame and anchored /secondary beams within the scope of DBYBHY-2007 and TBDY-2018

Orhan DOĞAN^{1*}, Yunus GENÇ², Melek AKGÜL³

¹Kırıkkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, odogan67@hotmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4942-1725

²Kırıkkale Üniversitesi, FBE, İnşaat Müh. ABD, yunusgenc71@yandex.com,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1163-0724

³Munzur Üniversitesi, Tunceli MYO, melekakgul@munzur.edu.tr
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8815-3762

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 5 Ocak 2022
Revizyon 19 Mayıs 2022
Kabul 18 Haziran 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

Saplama kiriş (ikincil kiriş), çerçeve kiriş, bina taban kesme kuvveti, Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018), düşey deprem etkisi.

ÖZ

Saplama/ikincil kirişler, uçlarından kolon, perde veya kirişlerle mesnetlenmemiş kirişlerdir. Kirişlerin kolonlarla desteklenmemesi durumunda, kiriş yükleri başka kirişlere aktarılarak başka bir ifade ile ikincil kirişler oluşturularak yükler dolaylı yollardan düşey taşıyıcı elemanlara aktarılmış olur. Bu durum, ikincil kirişleri taşıyan çerçeve kirişte kesme ve moment artışı ile birlikte, ilave burulma momentlerine, ayrıca ilave yatay ve düşey deprem yüklerinden dolayı da bu kirişlerin hasar görmesine neden olabilmektedir. Bu çalışmada, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (TS-500), Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007) ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) kapsamında, farklı deprem bölgeleri için betonarme çerçeve ve ikincil kirişlerin kesit tesirlerindeki değişimleri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla, TS-500, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 kurallarına uygun çerçeve sistemden oluşan beş katlı simetrik plana sahip betonarme bina modellenmiş ve ülkemizin 5 farklı deprem bölgesi için (Sakarya-Akyazı, İstanbul-Silivri, Çankırı-Kızılırmak, Ankara-Yenimahalle, Karaman-Merkez) belirlenen en yüksek yer ivmeleri (PGA) baz alınarak, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 deprem yönetmeliklerine göre eşdeğer deprem yükü yöntemi ile SAP2000 bilgisayar programında analizleri yapılmıştır. TBDY-2018 yönetmeliği ile artan bina doğal titreşim periyotları ve toplam eşdeğer deprem yüklerine (taban kesme kuvveti) ek olarak düşey deprem etkisinin de dikkate alınması ile çerçeve ve ikincil kiriş mesnet momentlerinde de yaklaşık 4 katına varan artışlar görülmüştür. Mesnet momentlerindeki bu artışta düşey deprem etkisi payının, konsol kirişlerde yaklaşık %20'lerde olduğu görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 January 2022
Received in revised form 19 May 2022
Accepted 18 June 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Anchored beam (secondary beam), frame beam, base shear force, Turkish Building Earthquake Code (TBDY-2018), vertical earthquake effect.

Doi: 10.24012/dumf.1053898

* Sorumlu Yazar

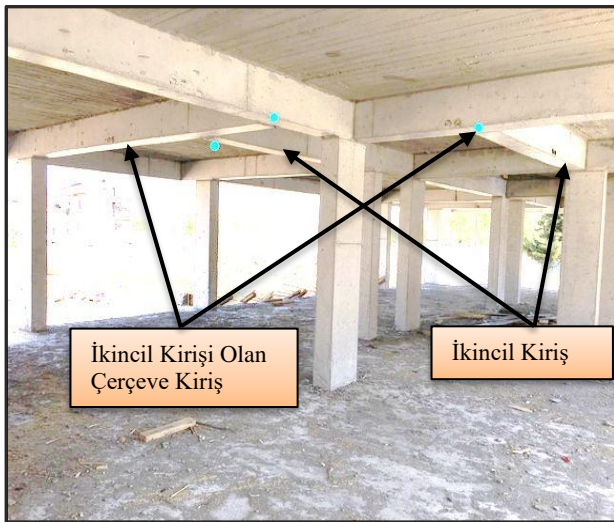
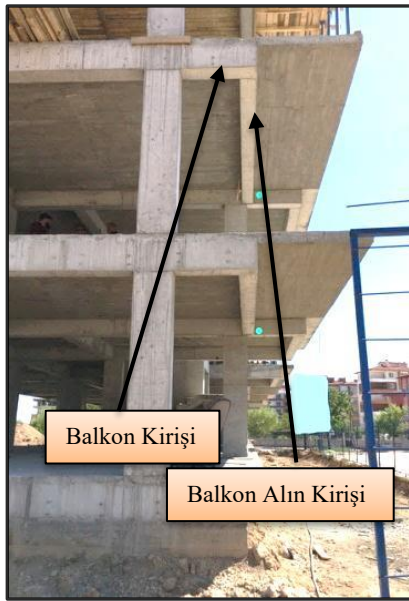
ABSTRACT

Anchored/secondary beams are beams that are not supported at their ends by column, shear wall or beams. In case the beams are not supported by columns, beam loads are transferred to other beams, in other words by forming secondary beams, loads are transferred to vertical load-bearing elements indirectly. This situation, together with the shear and moment increase in the frame beam carrying the secondary beams, may cause additional torsion moments, as well as damage to the these beams due to additional horizontal and vertical earthquake loads. In this study, the changes in the cross-sectional effects of reinforced concrete frames and secondary beams for different earthquake zones within the scope of Requirements for Design and Construction of Reinforced Concrete Structures (TS-500), Regulations on Buildings to be Built in Earthquake Zones (DBYBHY-2007) and Turkish Building Earthquake Code (TBDY-2018) analyzed comparatively. For this purpose, a five-storey reinforced concrete building with a symmetrical plan consisting of a frame system in accordance with the rules of TS-500, DBYBHY-2007 and TBDY-2018 was modeled and for 5 different earthquake zones of Turkey (Sakarya-Akyazı, İstanbul-Silivri, Çankırı-Kızılırmak, Ankara-Yenimahalle Karaman-Merkez) based on the determined peak ground accelerations (PGA) and analyzes were made in the SAP2000 computer program with the equivalent earthquake load method according to the DBYBHY-2007 and TBDY-2018 earthquake codes. With the TBDY-2018 code, besides the additional vertical earthquake effect, when both the increase in natural vibration periods and the increase in the total equivalent lateral earthquake effects (base shear force) of a building having been taken into account, the frame and secondary beam support moments have increased approximately 4 times. It has been observed that the ratio of vertical earthquake effect in this increase in support moments is approximately 20% for cantilever beams.

Giriş

Saplama veya ikincil kirişler, doğrudan her iki ucundan kolon veya perdelerle mesnetlenmeyen, bir veya iki ucundan başka kiriş/kirişlere mesnetlenen kirişler ve konsol/çıkma kirişlerdir.

İkincil kirişin mesnetlendiği çerçeve kirişin veya taşıyan kirişin burulma rijitliğinden dolayı ikincil kirişlerin uçlarında oluşan eğilme momenti, taşıyan kirişte burulma momenti direncine bağlı olarak kesme gerilmesinde artışa sebep olacağından hesaplamalarda bu etki-tepkinin dikkate alınması gerekmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. İkincil kiriş örnekleri

Betonarme taşıyıcı elemanların tasarımında, kirişlerin birleştiği noktalara kolon koyarak, kiriş yüklerinin en kısa yoldan kolonlara aktarılması hedeflenmektedir. Kolonun olmaması durumunda kirişlerden biri diğerini taşımaktadır. Yakın boylardaki kirişlerde taşıyan kirişin hangisi olduğu

anlaşılmazken, daha rijit olan kiriş diğerini taşıyacaktır. İmar planlarından kaynaklanan parsel geometrisine bağlı bina tasarımının yapılması, bina içerisindeki mahallerin kullanımı ve duvar yerleşiminden dolayı kirişlerin düzenli bir şekilde yerleştirilmesi oldukça zorlaşmaktadır. Bu durum ise, başka bir problem olan ikincil kiriş oluşumuna sebebiyet vermektedir. Ayrıca, kirişlerin birleştiği her birleşim noktasına kolon yerleştirildiğinde birbirine çok yakın kolonlar ve çok küçük açıklıklı kirişler oluşacağından veya kolonun merdivene, pencereye-kapıya denk gelmesinden dolayı bazı kirişler ikincil kiriş yapılmak zorunda kalınmaktadır. İkincil kirişlerden uzak durmak, ikincil bir kirişe başka bir ikincil kirişi mesnetlemekten ise kaçınılmalıdır [1].

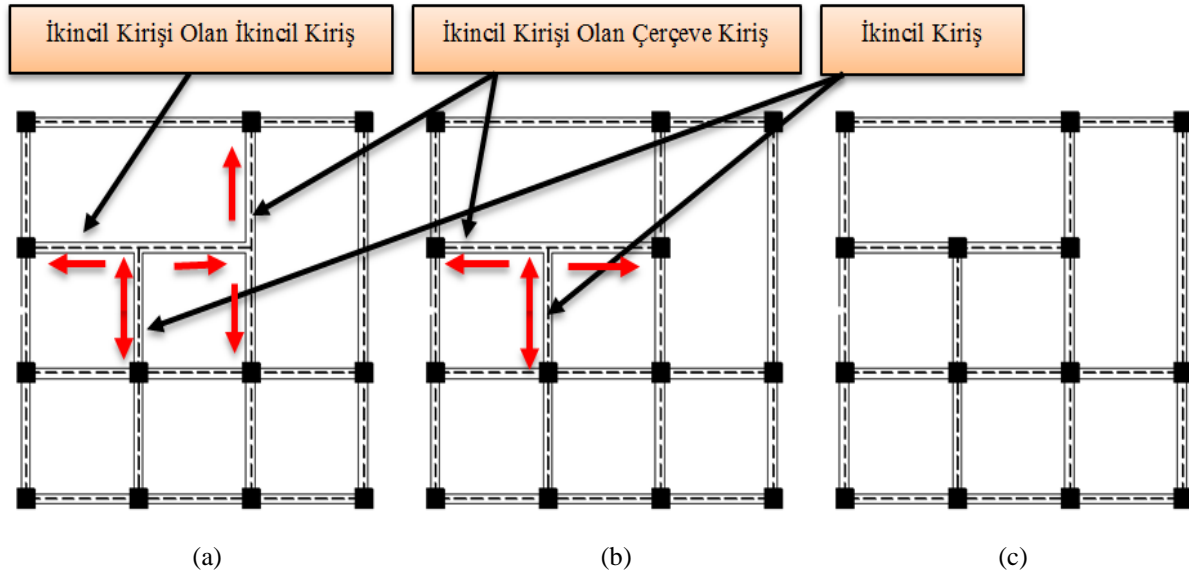
İkincil kirişlerin oluşturabileceği sakıncalar aşağıda verilmiştir [1].

- Kiriş yükü, en kısa yoldan kolon veya perdelerle değil, dolaylı yollardan birikerek kirişten kirişe aktarılır. (Şekil)
- Yatay deprem kuvvetinin kolondan kolona veya perdeden perdeye aktarımı güçleşir.
- İkincil kirişi olan çerçeve kirişin momenti ve kesme kuvveti daha büyük olur.
- İkincil kirişi olan çerçeve kirişte büyük sehim meydana gelir.
- İkincil kirişi olan çerçeve kirişte burulma momenti oluşur.
- İkincil kirişi olan çerçeve kirişte kesme ve çekme çatlakları daha belirgin olur.
- İkincil kirişi olan çerçeve kirişe depremde yatay kuvvet etkir.

İkincil kirişler için alınabilecek önlemler aşağıda verilmiştir [1].

- İkincil kirişin ucuna kolon koyarak veya ikincil kiriş kaldırılarak.
- İkincil kirişi, çerçeve kirişe özel tedbirler ile bağlayarak (askı çubukları) [2].
- Taşman kirişin taşıyan kirişle birleştiği bölgede, taşıyan kirişin etriyesi sıklaştırılarak.

Şekil 2(a) ve Şekil 2(b)'de verilen modellerde görüldüğü üzere, kiriş birleşim bölgelerinde düşey taşıyıcı elemanların bulunmaması durumunda, kiriş yükleri başka kirişlere aktararak dolaylı yollardan düşey taşıyıcı elemanlara (kolon, perde) aktarılmaktadır. Bu durum, ikincil kirişi olan çerçeve kirişte kesme ve moment artışı ile birlikte, kolonlarda ilave burulma momentlerine neden olmaktadır. Şekil 2(c)'de verilen modelde ise, kiriş yükleri en kısa yoldan kolon veya perdelerle aktarılmaktadır.



Şekil 2. Kiriş yük aktarımı (a) Uygun olmayan tasarım, (b) Uygun tasarım (c) Daha uygun tasarım

Bir kolon-kiriş birleşim bölgesi yakınında yer alan ikincil kirişler, mesnetlendiği kiriş üzerinde eğilme çatlamaına yol açarken, kiriş ortasına mesnetlenen ikincil kirişlerde ise askı donatıları kullanılmadığında mesnetlendiği kirişte kesme çatlaklarına benzer çatlaklara yol açmaktadır [3]. Büyük depremlerden sonra, kolonlarda, kirişlerde ve kolon-kiriş birleşim bölgelerinde ciddi hasarlar meydana gelebilmektedir [4]–[5]. 24 Ocak 2020 tarihinde yıkıcı olan Sivrice depremi sonrası yapılan hasar incelemesinde, dolgu duvarların kirişe oturması yaklaşımından dolayı ikincil kiriş tasarımının oldukça fazla olduğu, çerçeve kirişlerin mesnet bölgesi dışında, ikincil kirişin mesnetlendiği taşıyan kirişlerde ve kapalı çıkmaları taşıyan konsol kirişlerde yaygın kesme hasarı meydana geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 3) [6].



Şekil 3. Kapalı çıkma konsol (ikincil) kirişin hasarı [6]

TS-500 ve TBDY-2018'e göre, kirişlerin çerçeve kiriş olarak kabul edilebilmesi için kirişlerin yüksekliği, tabliye kalınlığının 3 katından ve 30 cm'den daha az, kiriş gövde genişliğinin 3.5 katından da daha fazla olmaması gerekmektedir. İkincil kirişler döşeme kirişleri olup, TS-500 ve TBDY-2018'de (boyutlandırılması bakımından) çerçeve kiriş olarak değerlendirilmemesi gerektiği vurgulanmaktadır [2],[7].

Betonarme çerçeve ve ikincil kirişlerin kesit tesirlerini etkileyen en önemli faktörlerden biri yatay deprem kuvvetlerinden dolayı binaya etkiyen taban kesme kuvvetidir [8]. DBYBHY-2007 ile TBDY-2018 deprem

yönetmelikleri arasında taban kesme kuvvetini karşılaştırabilmek için konumu, bina kat sayısı, yapı davranış katsayısı (bina yüksekliği), zemin sınıfı, bina önem kat sayısı gibi farklı değişkenler kullanılarak çeşitli araştırmalar yapılmıştır [9]–[17].

Tunç vd. (2016), Ünsal vd. (2020), Özmen vd. (2021), Aksoylu vd. (2021), TBDY-2018'e göre yapılan çözümlerde taban kesme kuvvetlerinde azalma olduğunu vurgulamışlardır [9]–[12]. Sümer vd. (2020), taban kesme kuvvetinin genel olarak kat adedi arttıkça DBYBHY-2007'ye kıyasla daha düşük değerler verdiğini belirtmişlerdir [13]. Bozer (2020), özellikle zayıf zeminlerde TBDY-2018'e göre hesaplanan tasarım spektral değerlerinin birçok il merkezinde artış gösterdiğini belirlemiştir [14]. Döndüren vd. (2021), TBDY-2018'e göre elde edilen kat kesme kuvvetlerinde genellikle azalma görüldüğü, ancak çerçevesiz-bodumsuz modellerden birinde ZA (Z1) zemin sınıfında TBDY-2018'e göre elde edilen kat kesme kuvvetlerinde %2 azalma olurken ZD (Z3) zemin sınıfında %28~%34 oranında bir artış meydana geldiği sonucuna varmışlardır [15]. Keskin vd. (2018), tarafından yapılan çalışmada ise, ZC (Z2) ve ZE (Z4) zemin sınıfları için TBDY-2018'e göre yapılan çözümlerde taban kesme kuvvetinin arttığı, bu artışın ZE (Z4) zemin sınıfı için 3.26 kat olduğu belirtilmiştir [16]. Atmaca vd. (2019) ise, taban kesme kuvvetlerindeki artışın %12-%25 olduğunu vurgulamışlardır [17]. Yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere, TBDY-2018'e göre taban kesme kuvvetlerinde ciddi farklılıkların olduğu görülmüştür.

Bununla beraber, TBDY-2018'de taban kesme kuvvetlerindeki değişimin yanı sıra, düşey deprem etkisinin de %30'u ilave edilerek kombinasyonlara dâhil edilmiştir. Doğan vd. (2019), 5 katlı bir bina üzerinde yaptığı çalışmada, binada oluşacak ikinci mertebe taban momentinin yatay deprem kuvvetinin oluşturduğu taban momentine oranının yaklaşık %5.71 olduğunu, düşey deprem etkisinin de %30 oranında dâhil edilmesi ile bu oranın %7.21'e çıktığını belirtmişlerdir [18]. Yavaş vd.

(2019), düşey deprem etkisinin kolonlarda aksel kuvveti artırmasına rağmen düşey depremin oluşturduğu momentin düşük seviyede kaldığını gözlemişlerdir [19].

Genç (2019) tarafından konuya yakın yapılan bir çalışmada ise, TBDY-2018 deprem yönetmeliği ile birlikte kirişlerdeki kesme kuvvetinin DBYBHY-2007'ye göre çok fazla arttığı, bu artışın çerçeve kirişlerde %41.11'e kadar, ikincil kirişlerde ise %71.96'ya kadar çıktığı belirtilmiştir [20].

Literatürde yer alan çalışmalarda görüldüğü üzere; TBDY-2018'e göre taban kesme kuvvetlerinde ciddi farklılıkların olduğu ve düşey depremin taşıyıcı elemanlara ilave etkisi vurgulanmış, fakat taban kesme kuvvetlerindeki değişimin ve düşey deprem etkisinin getirdiği ilave deprem yükünün ikincil kirişlerin mesnet eğilme momentlerine etkisi detaylı olarak araştırılmamıştır.

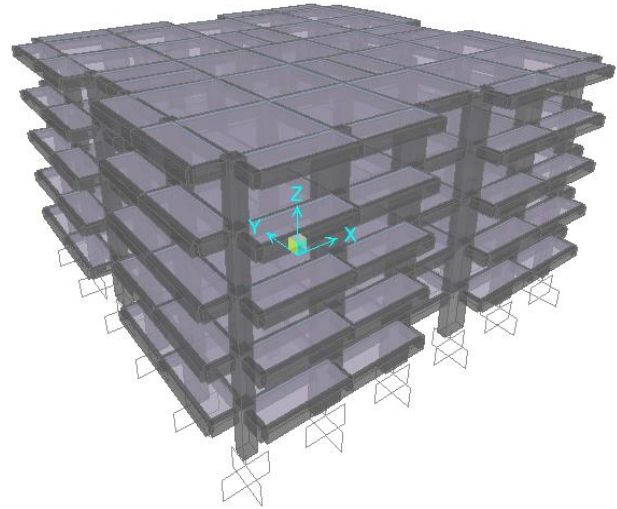
Bu çalışmada, betonarme çerçeve ve ikincil kirişlerin TBDY-2018 deprem yönetmeliği, DBYBHY-2007 deprem yönetmeliği ve TS-500'e göre mesnet kesitlerindeki moment değişimleri farklı deprem bölgeleri için karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla, TS-500, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 kurallarına uygun çerçeve sistemden oluşan beş katlı simetrik plana sahip betonarme bina modellenmiştir. Ülkemizin 5 farklı deprem bölgesi için (Sakarya-Akyazı, İstanbul-Silivri, Çankırı-Kızılırmak, Ankara-Yenimahalle, Karaman-Merkez) belirlenen en yüksek yer ivmeler (PGA) baz alınarak, TBDY-2018 ve DBYBHY-2007 deprem yönetmeliklerine göre eşdeğer deprem yükü yöntemi ile SAP2000 bilgisayar programında analizleri yapılmıştır. Bu bağlamda, 5 farklı deprem bölgesi için TS-500, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018'de verilen kombinasyonlara göre; bina doğal titreşim periyotları, toplam eşdeğer deprem yükleri hesaplanmış, 4 adet ikincil kiriş (iki ucu kirişe mesnetlenen kiriş, bir ucu kirişe bir ucu kolona mesnetlenen kiriş, balkon konsol kirişi, balkon uç kirişi) ve 1 adet de çerçeve kirişi olmak üzere toplam 5 adet farklı mesnetlenmiş kirişin mesnet eğilme momentlerinin değişimine ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır.

Yöntem

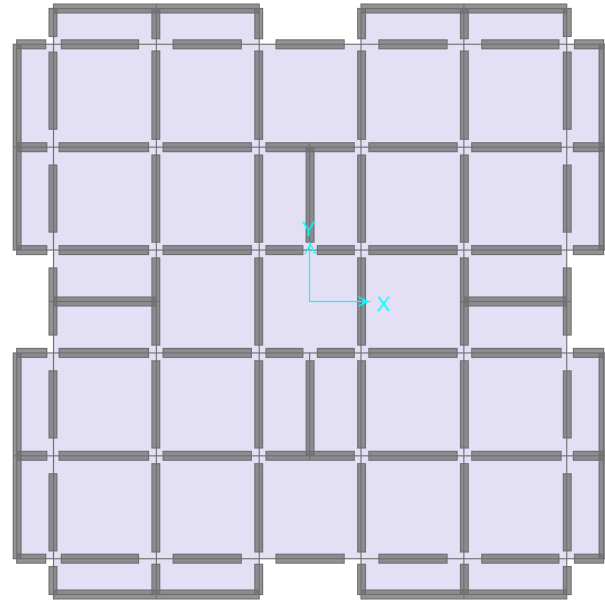
Bina geometrisi ve analize esas proje parametreleri

Bina geometrisi olarak, TS-500, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 kurallarına uygun zemin+4 normal katlı betonarme çerçevesi, planda simetrik bir bina tasarlanmış, kat yükseklikleri 3 m, kat planı balkonlar da dikkate alındığında 28.50x28.50 m, döşeme kalınlıkları 15 cm, kiriş boyutları 40x50cm, köşe kolon boyutları 55x55cm, köşe kolonları hariç dış çerçeve kolon boyutları 110x40cm ve iç kolon boyutları ise 50x50cm seçilmiştir. SAP2000 analiz programında her iki deprem doğrultusunda analizleri yapılmış olup Şekil 4'te binanın SAP2000 modeli ve kat planı verilmiştir [21]. Programda, kiriş ve kolon çubuk, döşeme kabuk eleman olarak modellenmiş, kolonlar temele ankastre olarak mesnetlenmiş ve döşemelerin kendi kat seviyelerinde rijit diyafram olarak çalıştığı kabul edilmiştir. Deprem yükleri altındaki binanın davranışı, burulma düzensizliğinden dolayı olumsuz yönde

etkileneceğinden, bina modeli düzenli olarak tasarlanmıştır [7],[22].



(a)



(b)

Şekil 4. Örnek binanın (a) SAP2000 modeli (b) Kat planı Sabit ve hareketli yükler, TS-498'e uygun olarak seçilmiş; sabit yük olarak, normal kat döşemeleri için 2.12 kN/m², çatı katı döşemeleri için 1.50 kN/m² ve hareketli yük olarak normal kat döşemeleri ve balkonlar için 2.00 kN/m², çatı katı döşemeleri içinse 1.50 kN/m² olarak alınmıştır. Çalışmada 1 ton, 10 kN olarak kabul edilmiştir. Beton sınıfı C25 olup, betonarme birim hacim ağırlığı 25.00 kN/m³ alınmıştır [23].

Deprem analizinde parametreler seçilirken en olumsuz koşullar göz önünde bulundurulmuştur. DBYBHY-2007 denklemleri için; idare bina için bina önem katsayısı I=1.50, taşıyıcı sistem davranış katsayısı süneklik düzeyi yüksek için R=8; yerel zemin sınıfı Z3 için spektrum karakteristik periyotları T_A=0.15 s ve T_B=0.60 s, etkin spektrum katsayısı S(T)=2.50, deprem yükü azaltma

katsayısı 8, hareketli yük katılım katsayısı $n=0.30$ seçilmiş ve eşdeğer deprem yükü yöntemi ile analizleri yapılmıştır [22].

TBDY-2018 denklemleri için; idare bina için Bina

$$V_t = \frac{W A_0 I S(T)}{R_a} \geq 0.10 A_0 I W \quad (1)$$

TBDY-2018'de göz önüne alınan deprem doğrultusunda,

Tablo 1. Farklı deprem bölgelerine ve DBYBHY-2007 ile TBDY-2018 yönetmeliklerine bağlı deprem parametreleri

Yer	Enlem/ Boylam	DBYBHY-2007			TBDY-2018		
		Deprem Bölgesi	Etkin Yer İvme Katsayısı	Elastik Spektral İvme (g)	En Yüksek Yer İvmesi PGA (g)	S_{DS}/S_{D1}	Elastik Spektral İvme (g)
Sakarya- Akyazı	40.683916°/ 30.625268°	1	0.40	1.500	0.712	1.748/ 0.864	1.748
İstanbul- Silivri	41.073672°/ 28.24779°	2	0.30	1.125	0.322	0.931/ 0.494	0.931
Çankırı- Kızılırmak	40.347449°/ 33.987163°	3	0.20	0.750	0.187	0.634/ 0.355	0.634
Ankara- Yenimahalle	39.967163°/ 32.792587°	4	0.10	0.375	0.147	0.518/ 0.290	0.518
Karaman- Merkez	37.181204°/ 33.222289°	5	-	0.000	0.104	0.374/ 0.142	0.347

Kullanım Sınıfı BKS=1, bina önem katsayısı $I=1.50$, zemin sınıfı ZD, Deprem Tasarım Sınıfı DTS=1a, Bina Yükseklik Sınıfı 15.00 m için BYS=6, taşıyıcı sistem davranış katsayısı süneklik düzeyi yüksek için $R=8$; dayanım fazlalığı katsayısı $D=3$, yatay elastik tasarım spektral ivmesi $S_{ac}(T)=0.343g \sim 1.748g$ arasında lokasyona göre değişken, deprem yükü azaltma katsayısı $R_a(T)=4.70 \sim 5.33$ arasında lokasyona göre değişken, azaltılmış tasarım spektral ivmesi $S_{ar}(T)=0.064 \sim 0.355g$ arasında lokasyona göre değişken, hareketli yük katılım katsayısı $n=0.30$ seçilmiş ve kontrollü hasar performans hedefini sağlamak üzere, dayanıma göre tasarım hesap esasları dikkate alınarak eşdeğer deprem yükü yöntemi ile analizleri yapılmıştır [7].

DBYBHY-2007'de yer alan Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasına göre 5 farklı deprem bölgesinde bulunan yerlerin etkin yer ivme katsayısı ile bu yerlere ait koordinatlar için TBDY-2018'de yer alan Türkiye Deprem Tehlike Haritasına göre belirlenen en yüksek yer ivmesi PGA (g) ve 50 yıl içerisinde aşılma olasılığı %10 olan DD-2 deprem yer hareketi düzeyine ait kısa periyot ve 1.0 s periyot için tasarım spektral ivme katsayıları (S_{DS} ve S_{D1}) ile elastik spektral ivmeler (g) Tablo 1'de verilmiştir [24].

DBYBHY-2007 ve TBDY-2018'e göre, analizi yapılan binada burulma düzensizliği ve yumuşak kat düzensizliği bulunmadığından ve bina yüksekliğinin 15 m (BYS=6) olmasından dolayı eşdeğer deprem yükü yöntemi uygulanmıştır.

DBYBHY-2007'de göz önüne alınan deprem doğrultusunda, binanın tamamına etkiyen toplam eşdeğer deprem yükü (taban kesme kuvveti) V_t , Denklem 1'e göre belirlenmektedir [22].

binanın tamamına etkiyen toplam eşdeğer deprem yükü (taban kesme kuvveti) V_{tE} Denklem 2'ye göre belirlenmektedir [7].

$$V_{tE} = m_t S_{ar} (T_p) \geq 0.04 m_t g I S_{DS} \quad (2)$$

Binanın deprem yüklerinin hesaplanmasında kullanılacak toplam ağırlığı ve toplam kütlesi (m_t), sabit kütlelerin ve hareketli yük katılım katsayısı kullanılarak hesaplanmış ve 48176.50 kN olarak bulunmuştur.

TS-500'e göre deprem etkisiz olduğu için, sabit (G) ve hareketli yük (Q) etkilerini içeren Denklem 3 kombinasyonu dikkate alınmıştır [2].

$$1.4G + 1.6Q \quad (3)$$

DBYBHY-2007'ye göre, sabit (G) ve hareketli yük (Q) etkilerini, x doğrultusundaki (E_x) ve y doğrultusundaki deprem etkilerini (E_y) içeren Denklem 4 kombinasyonu dikkate alınmıştır [22].

$$G + Q + E_x + 0.3E_y \quad (4)$$

TBDY-2018'e göre, sabit (G) ve hareketli yük (Q) etkilerini, x doğrultusundaki (E_x) ve y doğrultusundaki deprem etkileri (E_y) ile z doğrultusundaki (E_z) deprem etkisini içeren Denklem 5 kombinasyonu dikkate alınmıştır [7].

$$G + Q + E_x + 0.3E_y + 0.3E_z \quad (5)$$

TBDY-2018'e göre düşey deprem hesabı, Deprem Tasarım Sınıfı (DTS) 1, 1a, 2 veya 2a olan ve aşağıda yer alan elemanları içeren binalarda, sadece bu elemanlara

tanımlanan düşey elastik ivme spektrumuna göre yapılmaktadır [7].

- Açıklıklarının yataydaki izdüşüm uzunluğu; 20 m veya üzeri olan kirişleri içeren veya 20 m veya üzeri olan konsolları içeren binalar
- Kirişlere oturan kolonları bulunan binalar
- Düşeye göre eğimli kolonları bulunan binalar

Bu elemanların dışındaki taşıyıcı sistem kısımlarında ve bu elemanları içermeyen binalarda düşey deprem etkisi (E_z), sabit yük etkisi (G) ve kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısına (S_{DS}) bağlı olarak Denklem 6'da verilen denkleme göre yaklaşık hesaplanmaktadır [7]. Yapılan çalışmada, bu tanımda geçen elemanlar yer almadığı için düşey deprem etkisi (E_z) Denklem 6'ya göre hesaplanmıştır.

$$E_z \approx (2/3) S_{DS} G \quad (6)$$

Kar yükü, kombinasyonlarda dikkate alınmayıp, çatı katı döşemelerinde sabit yüke dâhil edilmiştir. Hesaplamalarda, x-x ve y-y doğrultularındaki pozitif ve negatif %5 ek dış merkezlik dikkate alınmamıştır.

Bulgular ve Değerlendirme

Bu çalışmada, betonarme çerçeve ve ikincil olmak üzere farklı mesnetlenmiş 5 adet kirişin TBDY-2018 deprem yönetmeliği ile kesit tesirlerindeki değişimin incelenmesi için, ülkemizin 5 farklı deprem bölgesinde bulunan, 5 katlı ve planda simetrik tasarlanan bir binanın DBYBHY-2007 ile TBDY-2018'e göre eşdeğer deprem yükü yöntemi ile deprem analizleri SAP2000 programında yapılmış olup bina doğal titreşim periyotları ile toplam eşdeğer deprem yükleri Tablo 2'de verilmiştir.

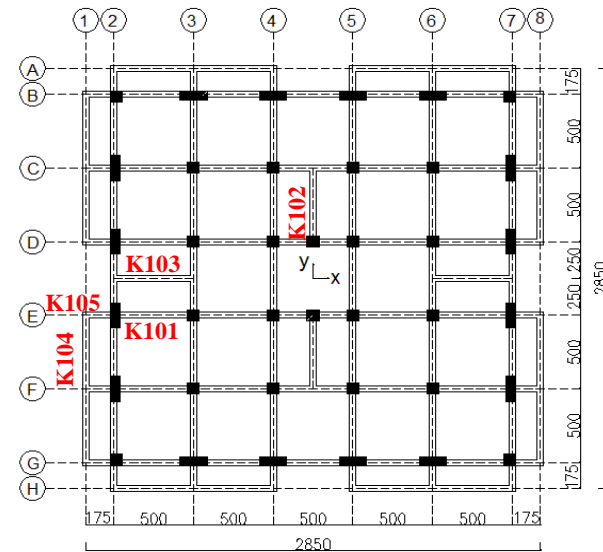
Tablo 2. Farklı deprem bölgelerine ve DBYBHY-2007 ile TBDY-2018 yönetmeliklerine bağlı bina doğal titreşim periyodu ve toplam eşdeğer deprem yükü

Yer	DBYBHY-2007			TBDY-2018			
	Doğal Titreşim Periyodu (s)	Toplam Eşdeğer Deprem Yüğü (kN)	Doğal Tit. Periy. (s)	Toplam Eşdeğer Deprem Yüğü (kN)			
	T_x	T_y	$V_x=V_y$	T_x	T_y	V_x	V_y
Sakarya-Akyazı		9033.10		17102.60	17010.60		
İstanbul-Silivri		6774.80		9357.90	9309.70		
Çankırı-Kızılırmak	0.2845	0.2902	4516.50	0.4076	0.4133	6497.90	6465.60
Ankara-Y.Mahalle			2258.30			5310.00	5283.50
Karaman-Merkez			0.00			3137.80	3095.00

Binanın doğal titreşim periyodu, yapının ağırlığına ve taşıyıcı sistemin yatay yüklere karşı rijitliğine bağlı olup, DBYBHY-2007'ye göre x-x doğrultusunda 0.2845 s, y-y doğrultusunda 0.2902 s iken; TBDY-2018'de x-x doğrultusunda 0.4076 s, y-y doğrultusunda ise 0.4133 s bulunmuştur. Her iki deprem doğrultusundaki bina doğal titreşim periyotlarının TBDY-2018'de daha fazla olduğu görülmüş olup, DBYBHY-2007'ye göre bu artış oranı yaklaşık $(0.4076/0.2845=)$ 1.43 hesaplanmıştır. Bu artışın nedeni, TBDY-2018'de, taşıyıcı sistem elemanları olan kolon ve kirişlerin etkin kesit rijitliklerinin (kolon için 0.70, kiriş için 0.35) kullanılmasından kaynaklanmaktadır [20],[25]. Ayrıca, ikincil ve çerçeve kirişlerin yerleşim planından dolayı da, x-x ve y-y doğrultularındaki bina doğal titreşim periyotları farklı çıkmaktadır.

Ülkemizdeki 5 farklı deprem bölgesi için bulunan toplam eşdeğer deprem yükleri (taban kesme kuvvetleri), TBDY-2018'de daha fazla çıkmaktadır. Örneğin, PGA değeri 0.712g olan ve DBYBHY-2007'ye göre 1. derece deprem bölgesinde bulunan Sakarya-Akyazı için toplam eşdeğer deprem yükü, DBYBHY-2007'ye göre x-x ve y-y doğrultusunda 9033.10 kN iken, TBDY-2018'e göre x-x doğrultusunda 17102.60 kN, y-y doğrultusunda ise 17010.60 kN bulunmuş olup DBYBHY-2007'ye göre bu artış oranı yaklaşık $(17102.60/9033.10=)$ 1.89 hesaplanmıştır. Diğer lokasyonlar için bu artış oranları Tablo 4'te verilmiştir. Ancak, PGA değeri 0.104g olan, DBYBHY-2007'ye göre deprem hesabı yapılmayan ve 5. derece deprem bölgesinde bulunan Karaman-Merkez için TBDY-2018'e göre x-x doğrultusunda 3137.80 kN, y-y doğrultusunda ise 3095.00 kN çıkmıştır.

Betonarme çerçeve ve ikincil kirişlerin kesit tesirlerindeki değişimin incelenmesi için binanın tüm kirişlerini karşılaştırmak gereksiz ve oldukça uzun olacağı için, binanın sadece birinci katında yer alan ve Şekil 5'te kat planında gösterilen farklı mesnetlenmelere sahip K101, K102, K103 K104 ve K105 isimli kirişler değerlendirmeye alınmıştır. Bunlardan, K101 kirişi çerçeve kirişi olup, diğer kirişler ikincil kirişlerdir.

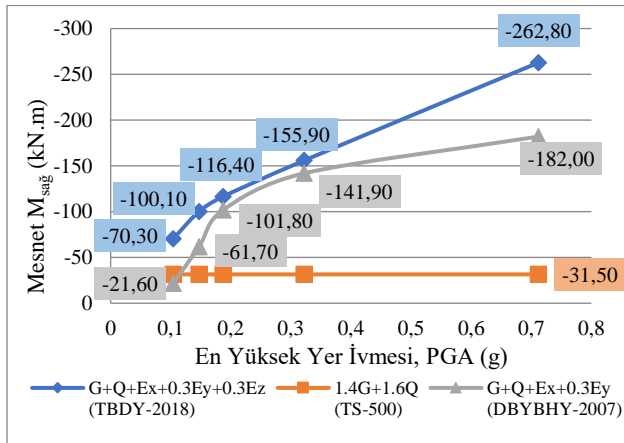


Şekil 5. 1.kat planı üzerinde çerçeve ve ikincil kirişlerin yeri (ölçüler cm)

Tablo 3. Çerçeve ve ikincil kirişlerin mesnet momentleri

Sıra No	Kiriş Adı ve Modeli	Deprem Bölgesi- En Yüksek Yer İvmesi PGA (g)	TS-500		DBYBHY-2007		TBDY-2018	
			1.4G+1.6Q		G+Q+E _x +0.3E _y		G+Q+E _x +0.3E _y +0.3E _z	
			M _{sol} (kN.m)	M _{sağ} (kN.m)	M _{sol} (kN.m)	M _{sağ} (kN.m)	M _{sol} (kN.m)	M _{sağ} (kN.m)
1	K101	1 - 0.712	-55.10	-31.50	123.60	-182.00	185.50	-262.80
		2 - 0.322			83.20	-141.90	86.90	-155.90
		3 - 0.187			42.80	-101.80	50.50	-116.40
		4 - 0.147			2.30	-61.70	35.30	-100.10
		5 - 0.104			-38.10	-21.60	7.40	-70.30
2	K102	1 - 0.712	-90.80	-13.60	48.90	-69.70	99.00	-140.70
		2 - 0.322			21.10	-54.60	27.50	-83.20
		3 - 0.187			-6.70	-39.50	1.10	-62.00
		4 - 0.147			-34.50	-24.30	-10.10	-53.20
		5 - 0.104			-62.30	-9.20	-30.90	-37.00
3	K103	1 - 0.712	-18.40	-9.20	13.10	-30.40	46.30	-75.40
		2 - 0.322			6.50	-24.40	18.50	-44.70
		3 - 0.187			0.00	-18.50	8.20	-33.30
		4 - 0.147			-6.50	-12.60	3.90	-28.60
		5 - 0.104			-13.10	-6.60	-4.10	-20.10
4	K104	1 - 0.712	-29.30	-18.80	-1.60	-4.20	20.70	-71.50
		2 - 0.322			-6.30	-28.90	1.50	-45.90
		3 - 0.187			-11.00	-23.60	-5.70	-36.50
		4 - 0.147			-15.70	-18.40	-8.70	-32.60
		5 - 0.104			-20.40	-13.10	-14.40	-25.50
5	K105	1 - 0.712	0.00	-74.20	0.00	-56.00	0.00	-82.60
		2 - 0.322			0.00	-55.10	0.00	-70.30
		3 - 0.187			0.00	-54.10	0.00	-65.70
		4 - 0.147			0.00	-53.10	0.00	-64.00
		5 - 0.104			0.00	-52.20	0.00	-61.00

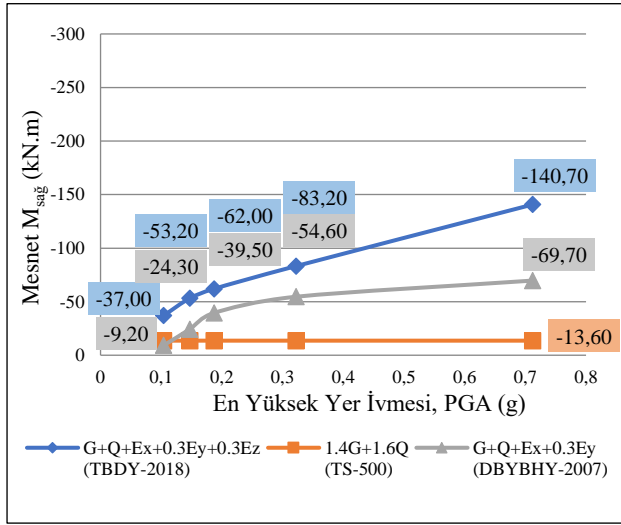
En yüksek yer ivmesi PGA, 0.104g ile 0.712g aralığında yer alan 5 farklı yer ivmesi için, çerçeve ve ikincil kirişlerin TS-500, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018'e göre hesaplanan mesnet momentleri Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te verilen çerçeve ve ikincil kirişlerin sağ mesnet momentleri, sol mesnet momentlerinden daha büyük olduğu için, bu çalışmada sağ mesnet momentleri dikkate alınmıştır.



Şekil 6. PGA'ya göre K101 kirişinin sağ mesnet momenti (kN.m)

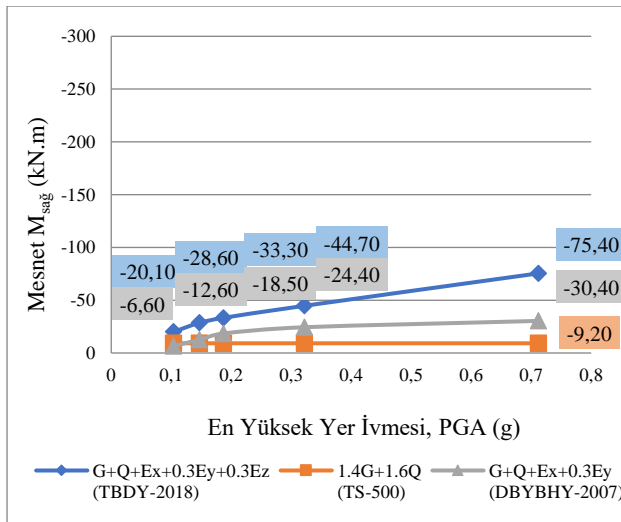
Ülkemizde en yüksek yer ivmesi PGA, 0.104g ile 0.712g aralığında yer alan 5 farklı yer ivmesi için TS-500, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018'e göre K101 kirişinin sağ mesnetindeki moment değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Burada TS-500'e göre deprem etkisiz "1.4G+1.6Q" kombinasyonu için K101 kirişinin sağ mesnet momenti -31.50 kN.m bulunmuştur. Ancak, PGA'sı 0.104g için DBYBHY-2007'ye göre depremsiz bölgedeki moment değeri -21.60 kN.m bulunmuşsa da, kombinasyon gereği TS-500 için bulunan -31.50 kN.m dikkate alınacaktır. Diğer tüm bölgeler için yatay deprem etkisini dikkate alan DBYBHY-2007'de "G+Q+E_x+0.3E_y" kombinasyonu için sağ mesnet momentinin arttığı, ancak düşey deprem etkisini de dikkate alan TBDY-2018'deki "G+Q+E_x+0.3E_y+0.3E_z" kombinasyonuna göre bu artışın daha da fazla olduğu görülmektedir. TS-500'e göre bu artış oranlarının PGA değerinin artması ile her iki deprem yönetmeliği için daha da arttığı görülmüştür. Örneğin; PGA değeri 0.322g için, DBYBHY-2007'ye göre bu oran (-141.90/-31.50=) 4.51, TBDY-2018'e göre bu oran (-155.90/-31.50=) 4.95 iken, PGA değeri 0.712g için, DBYBHY-2007'ye göre bu oran (-182.00/-31.50=) 5.78, TBDY-2018'e göre bu oran (-262.80/-31.50=) 8.34 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, TBDY-2018'e göre K101 kirişinin sağ mesnet momentinin DBYBHY-2007'ye göre

yaklaşık $(-262.80/-182.00=)$ 1.44 katı arttığı görülmektedir.



Şekil 7. PGA'ya göre K102 kirişinin sağ mesnet momenti (kN.m)

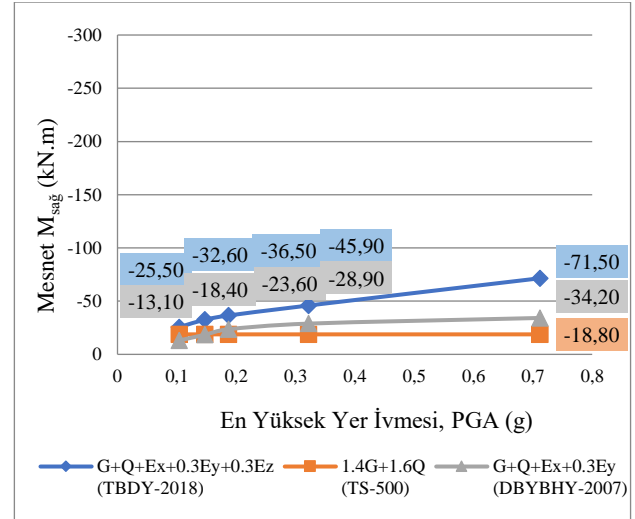
En yüksek yer ivmesi PGA, 0.104g ile 0.712g aralığında yer alan 5 farklı yer ivmesi için TS-500, DBYBHY-2007 ve TBODY-2018'e göre K102 kirişinin sağ mesnetindeki moment değişimi Şekil 7'de verilmiştir. PGA değerinin artması ile her iki deprem yönetmeliği için sağ mesnet momentinin daha da arttığı görülmüştür. Örneğin, PGA değeri 0.712g için, TS-500'e göre bu artış oranları, DBYBHY-2007'ye göre $(-69.70/-13.60=)$ 5.13, TBODY-2018'e göre $(-140.70/-13.60=)$ 10.35 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, TBODY-2018'e göre K102 kirişinin sağ mesnet momentinin DBYBHY-2007'ye göre yaklaşık $(-140.70/-69.70=)$ 2.02 katı arttığı görülmektedir.



Şekil 8. PGA'ya göre K103 kirişinin sağ mesnet momenti (kN.m)

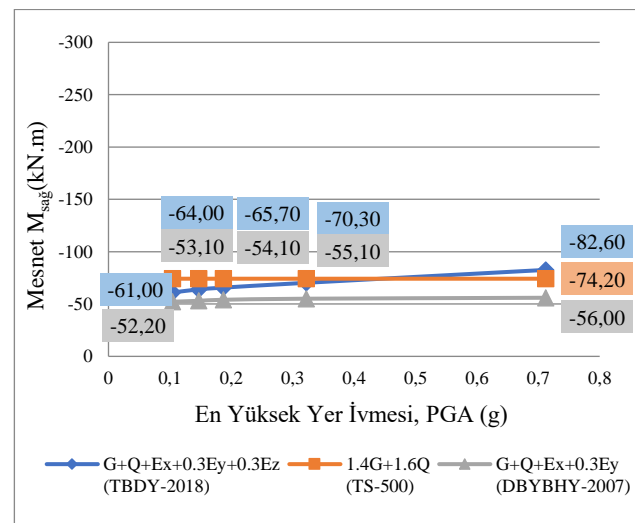
Ülkemizde en yüksek yer ivmesi PGA, 0.104g ile 0.712g aralığında yer alan 5 farklı yer ivmesi için TS-500, DBYBHY-2007 ve TBODY-2018'e göre K103 kirişinin sağ mesnetindeki moment değişimi Şekil 8'de verilmiştir. PGA değerinin artması ile her iki deprem yönetmeliği için sağ mesnet momentinin daha da arttığı görülmüştür.

Örneğin, PGA değeri 0.712g için, TS-500'e göre bu artış oranları, DBYBHY-2007'ye göre $(-30.40/-9.20=)$ 3.30, TBODY-2018'e göre $(-75.40/-9.20=)$ 8.20 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, TBODY-2018'e göre K103 kirişinin sağ mesnet momentinin DBYBHY-2007'ye göre yaklaşık $(-75.40/-30.40=)$ 2.48 katı arttığı görülmektedir.



Şekil 9. PGA'ya göre K104 kirişinin sağ mesnet momenti (kN.m)

En yüksek yer ivmesi PGA, 0.104g ile 0.712g aralığında yer alan 5 farklı yer ivmesi için TS-500, DBYBHY-2007 ve TBODY-2018'e göre K104 kirişinin sağ mesnetindeki moment değişimi Şekil 9'da verilmiştir. PGA değerinin artması ile her iki deprem yönetmeliği için sağ mesnet momentinin daha da arttığı görülmüştür. Örneğin, PGA değeri 0.712g için, TS-500'e göre bu artış oranları, DBYBHY-2007'ye göre $(-34.20/-18.80=)$ 1.82, TBODY-2018'e göre $(-71.50/-18.80=)$ 3.80 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, TBODY-2018'e göre K104 kirişinin sağ mesnet momentinin DBYBHY-2007'ye göre yaklaşık $(-71.50/-34.20=)$ 2.09 katı arttığı görülmektedir.



Şekil 10. PGA'ya göre K105 kirişinin sağ mesnet momenti (kN.m)

En yüksek yer ivmesi PGA, 0.104g ile 0.712g aralığında yer alan 5 farklı yer ivmesi için TS-500, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018'e göre K105 kirişinin sağ mesnetindeki moment değişimi Şekil 10'da verilmiştir. PGA değerinin artması ile her iki deprem yönetmeliği için sağ mesnet momentinin daha da arttığı görülmüştür. Fakat, TS-500 için bulunan moment değeri, DBYBHY-2007'ye göre bulunan moment değerlerinden daha fazla, TBDY-2018'e göre bulunan moment değerlerinden ise daha az olmaktadır. Örneğin, PGA değeri 0.712g için, DBYBHY-2007'ye göre bu oran (-56.00/-74.20=) 0.76, TBDY-2018'e göre bu oran (-82.60/-74.20=) 1.11 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, TBDY-2018'e göre K105 kirişinin sağ mesnet momentinin DBYBHY-2007'ye göre yaklaşık (-82.60/-56.00=) 1.48 katı arttığı görülmektedir.

Farklı 5 bölge için DBYBHY-2007'ye kıyasla TBDY-2018'deki eşdeğer deprem kuvvetindeki ve kirişlerin sağ mesnet momentlerindeki artış oranları Tablo 4'te verilmiştir. İkincil kirişlerdeki artış oranının çerçeve kirişe göre daha fazla olduğu görülmüştür. PGA değeri 0.104g için K101 çerçeve kirişinde artış oranı 3.26 iken, diğer ikincil kirişlerde bu artış oranının daha az olmasının nedeni ise, 5. derece deprem bölgesinde bulunmasından dolayı DBYBHY-2007'de yer alan "G+Q+E_x+0.3E_y" kombinasyonundaki deprem etkilerinin dikkate alınmamasıdır.

Tablo 4. Farklı bölgeler için TBDY-2018'deki, eşdeğer deprem kuvvetindeki (EDKAO) ve çerçeve ile ikincil kirişlerin sağ mesnet momentindeki artış oranları

Lokasyon	Karaman- Merkez	Ankara- Y.Mahalle	Çankırı- Kızılırmak	İstanbul- Silivri	Sakarya- Akyazı
2007 Deprem Bölgesi	5	4	3	2	1
PGA (g)	0.104	0.147	0.187	0.322	0.712
EDKAO	-	2.35	1.44	1.38	1.89
K101	3.26	1.62	1.14	1.10	1.44
K102	4.02	2.19	1.57	1.52	2.02
K103	3.05	2.27	1.80	1.83	2.48
K104	1.95	1.77	1.55	1.59	2.09
K105	1.17	1.21	1.21	1.28	1.48

Farklı 5 bölge için, deprem kombinasyonunda yer alan düşey deprem etkisinin çerçeve ve ikincil kirişlerin sağ mesnet momentlerindeki yüzde oranları Tablo 5'te verilmiştir. TBDY-2018'de yer alan "G+Q+E_x+0.3E_y+0.3E_z" kombinasyonunda yer alan düşey deprem etkisinin (0.3E_z) payı, çerçeve ve bir veya iki ucu kirişe mesnetlenen ikincil kirişlerde daha az (yaklaşık %2-

4) olurken, konsol kirişlerde yaklaşık %20'lerde olduğu görülmüştür.

Tablo 5. Deprem kombinasyonunda yer alan düşey deprem etkisinin çerçeve ve ikincil kirişlerin sağ mesnet momentlerindeki yüzde oranı

Kiriş Adı	Deprem Bölgesi- PGA (g)	M _{sağ} (kN.m)		Oranı (%)
		G+Q+E _x + 0.3E _y +0.3E _z	0.3E _z	
K101	1 - 0.712	-262.80	-6.90	2.63
	2 - 0.322	-155.90	-3.70	2.37
	3 - 0.187	-116.40	-2.60	2.23
	4 - 0.147	-100.10	-2.20	2.20
	5 - 0.104	-70.30	-1.50	2.13
K102	1 - 0.712	-140.70	-3.00	2.13
	2 - 0.322	-83.20	-1.70	2.04
	3 - 0.187	-62.00	-1.20	1.94
	4 - 0.147	-53.20	-1.00	1.88
	5 - 0.104	-37.00	-0.70	1.89
K103	1 - 0.712	-75.40	-3.00	3.98
	2 - 0.322	-44.70	-1.70	3.80
	3 - 0.187	-33.30	-1.20	3.60
	4 - 0.147	-28.60	-1.00	3.50
	5 - 0.104	-20.10	-0.70	3.48
K104	1 - 0.712	-71.50	-4.30	6.01
	2 - 0.322	-45.90	-2.40	5.23
	3 - 0.187	-36.50	-1.60	4.38
	4 - 0.147	-32.60	-1.40	4.29
	5 - 0.104	-25.50	-0.90	3.53
K105	1 - 0.712	-82.60	-17.20	20.82
	2 - 0.322	-70.30	-9.40	13.37
	3 - 0.187	-65.70	-6.40	9.74
	4 - 0.147	-64.00	-5.40	8.44
	5 - 0.104	-61.00	-3.70	6.07

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (TS-500), Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007) ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) kapsamında, ülkemizin DBYBHY-2007'ye göre 5 farklı deprem bölgesine göre (Sakarya-Akyazı, İstanbul-Silivri, Çankırı-Kızılırmak, Ankara-Yenimahalle, Karaman-Merkez) belirlenen en yüksek yer ivmeleri (PGA) baz alınarak, bina doğal titreşim periyotları, toplam eşdeğer deprem yükleri hesaplanmış, betonarme çerçeve ve saplama/ikincil kirişlerin kesit tesirlerindeki değişimlerinin karşılaştırılması olarak incelenmesi amacıyla yönetmelik kurallarına uygun çerçeve sistemden oluşan beş katlı simetrik plana sahip betonarme bina modellenmiş ve eşdeğer deprem yükü yöntemi ile SAP2000 bilgisayar programında analizleri yapılmıştır.

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, her iki deprem doğrultusundaki bina doğal titreşim periyotlarının TBDY-2018'de daha fazla olduğu görülmüş olup, DBYBHY-2007'ye göre bu artış oranı yaklaşık 1.43 hesaplanmıştır. Periyotlardaki bu artışın, TBDY-2018'de taşıyıcı sistem elemanları olan kolon ve kirişlerin etkin kesit rijitliklerinin (kolon için 0.70, kiriş için 0.35) kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Ülkemizdeki 5 farklı deprem bölgesi için TBDY-2018'e göre eşdeğer deprem yükü yöntemi ile yapılan analizlerde, bina doğal titreşim periyotlarının artmasına rağmen taban kesme kuvvetinin DBYBHY-2007'ye kıyasla 2.35'e varan oranlarda arttığı görülmüştür. Ayrıca, 5. derece deprem bölgesinde bulunan ve DBYBHY-2007'ye göre deprem hesabı yapılmayan Karaman-Merkez (Enlem 37.181204°, Boylam 33.222289°) lokasyonu için x-x doğrultusunda 3137.80 kN, y-y doğrultusunda ise 3095.00 kN taban kesme kuvveti bulunmuştur.

İkincil kirişlerde, TBDY-2018'e göre bulunan sağ mesnet momentlerinin DBYBHY-2007'ye göre artış oranlarının çerçeve kirişe göre daha fazla olduğu görülmüştür. Örneğin, PGA değeri 0.712g için K101 çerçeve kirişinde bu artış oranı 1.44 iken, K102 (bir ucu kirişe mesnetlenen kiriş), K103 (iki ucu kirişe mesnetlenen kiriş), K104 (iki ucundan konsolla desteklenen kiriş) ve K105 (konsol kiriş) ikincil kirişlerinde bu artış oranları sırasıyla 2.02, 2.48, 2.09 ve 1.48 bulunmuştur.

TBDY-2018'de yer alan "G+Q+E_x+0.3E_y+0.3E_z" kombinasyonunda yer alan düşey deprem etkisinin (0.3E_z) payı, çerçeve ve bir veya iki ucu kirişe mesnetlenen ikincil kirişlerde ihmal edilebilecek kadar az (yaklaşık %2-4) olurken, konsol olan ikincil kirişlerde %20.82 olduğu görülmüştür. TBDY-2018'e göre, yeni bina tasarımlarında deprem kuvvetlerine karşı kapalı çıkma konsol kiriş donatılarının da benzer oranda artacağı, mevcut betonarme binaların güçlendirilmelerine ek olarak özellikle kapalı çıkma konsol kirişlerinde de güçlendirme gerekebileceği düşünülmektedir.

Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçların, DBYBHY-2007'ye göre sırasıyla birinci, ikinci, üçüncü, dördüncü ve

beşinci derece deprem bölgelerinde bulunan Sakarya-Akyazı (Enlem 40.683916°, Boylam 30.625268°), İstanbul-Silivri (Enlem 41.073672°, Boylam 28.24779°), Çankırı-Kızılırmak (Enlem 40.347449°, Boylam 33.987163°), Ankara-Yenimahalle (Enlem 39.967163°, Boylam 32.792587°), Karaman-Merkez (Enlem 37.181204°, Boylam 33.222289°) lokasyonları için geçerli olduğundan ve Türkiye Deprem Tehlike Haritasından farklı koordinatlar için farklı spektrum değerlerine erişilebileceğinden, farklı lokasyon ve bina modelleri için bu çalışma genişletilebilir.

Ayrıca, ikincil kirişlere ait kesit tesirlerinin, tüm iç kuvvetler göz önüne alınarak, mod birleştirme ve zaman tanım alanında analiz yöntemleri ile farklı katlı ve kat planlı modellemelerde incelenmesi başka bir çalışmanın konusu olabilir.

Kaynakça

- [1] A. Topçu, "Betonarme Taşıyıcı Sistem, Dün-Bugün, İyi-Kötü, Doğrular-Yanlışlar-Hasarlar," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi-İMO Bursa*, Bursa, 2017.
- [2] TS500, "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [3] İ. Yüksel, "Betonarme Binaların Deprem Sonrası Acil Hasar Değerlendirmeleri," *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol.24, no.1-2, pp.260-276, 2008.
- [4] M.M. Kassem, F.M. Nazri, E.N. Farsangi, B. Öztürk "Development of a uniform seismic vulnerability index framework for reinforced concrete building typology," *Journal of Building Engineering*, vol.47, 2022.
- [5] M.M.Kassem, F.M.Nazri, E.N.Farsangi, B.Öztürk, "Improved Vulnerability Index Methodology to Quantify Seismic Risk and Loss Assessment in Reinforced Concrete Buildings," *Journal of Earthquake Engineering*, pp.1-36, 2021.
- [6] H. Şahin , K.E. Alyamaç, A.R. Durucan, B. Demirel, M. Ulaş Açıkgöç, A.T. Bildik, C. Durucan, T. Demir, M. Ulucan, N. Demirbaş, "24 Ocak 2020 Mw 6.8 Sivrice/Elazığ Depremi Elazığ Bölgesi Yapısal Hasarlar İnceleme ve Analiz Raporu", Yapı ve Beton Uygulama ve Araştırma Merkezi, *Fırat Üniversitesi*, Rapor No:2020/D001, Elazığ, Türkiye, 2020.
- [7] TBDY 2018, "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği", Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.
- [8] M.H. Akyıldız, A.E. Ulu, K. Adar, "TBDY-2018'deki Yerel Zemin Koşullarının Deprem Kesit Tesirlerine Etkisi," *DÜMF Mühendislik Dergisi*, vol.12, no.4, pp.679-687, 2021.
- [9] G. Tunç, T. Tanfener, "2007 ve 2016 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliklerinin Örneklerle Mukayesesi", *3.Ulusal Yapı Kongresi ve Sergisi Teknik Tasarım, Güvenlik ve Erişebilirlik, TMMOB Mimarlar Odası Ankara Şubesi*, Ankara, 2016.
- [10] İ. Ünsal, F.A. Öncel, M.F. Şahan, "TDY 2007 ve TBDY 2018 Yönetmeliklerine Göre Yapı Yüksekliğinin Taban Kesme Kuvveti ve Tepe

- Deplasmanı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi,” *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no.4, pp.930-942, 2020.
- [11] A. Özmen, S. Erkut, “Deprem Etkisinde Çok Katlı Betonarme Bir Binanın TDY-2007 ve TBDY-2018 Deprem Yönetmeliklerine Göre Eşdeğer Deprem Yüklerinin Karşılaştırılması,” *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 4, no.2, pp.124-133, 2021.
- [12] C. Aksoylu, M.H. Arslan, “2007 ve 2019 Deprem Yönetmeliklerinde Betonarme Binalar İçin Yer Alan Farklı Deprem Kuvveti Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması Olarak İrdelenmesi,” *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, vol. 13, no.2, pp.359-374, 2021.
- [13] Y. Sümer, M. Hamsici, “Çok Katlı Betonarme Binalarda 2018 Deprem Yönetmeliği İle Tanımlanan Spektrum Eğrilerinin Etkisi,” *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 2, pp.349-354, 2020.
- [14] A. Bozer, “Tasarım Spektral İvme Katsayılarının DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 Yönetmeliklerine Göre Karşılaştırması,” *DÜMF Mühendislik Dergisi*, vol.11, no.1, pp.393-404, 2020.
- [15] M.S. Döndüren, Ş. Hava, A.S. Ecemiş, “Betonarme Bir Binanın Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi İle DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 Yönetmeliklerine Göre Analizi,” *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 9, no.2, pp.507-521, 2021.
- [16] E. Keskin, K.B. Bozdoğan, “2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Kırklareli İli Özelinde Değerlendirilmesi,” *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 4, no.1, pp.74-90, 2018.
- [17] N. Atmaca, A. Atmaca, S. Kılçık, “Comparison of 2018 and 2007 Turkish Earthquake Regulations,” *The International Journal of Energy & Engineering Sciences*, vol.4, no.2, pp.19-25, 2019.
- [18] O. Doğan, Y. Genç, “Türk Bina Deprem Yönetmeliği’ne Göre Düşey Deprem Kuvvetinin İkinci Mertebeden Taban Momentlerine Etkisi,” *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol.5, no.3, pp.244-249, 2019.
- [19] M.Ş. Yavaş, A.N. Teloğlu, Z. Celep, “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde Binaların Taşıyıcı Sisteminde Tanımlanan Düşey Deprem Etkisi Üzerine,” *5. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (SICEES)*, Ankara, 2019.
- [20] Y. Genç, “Türk ve Bazı Yabancı Deprem Yönetmeliklerine Göre Betonarme Binaların Analizinde Düşey Deprem Yük Etkilerinin Araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 2019.
- [21] SAP2000 v19, “Structural Software for Analysis and Design”, Computers and Structures, California-USA, 2017.
- [22] DBYBHY 2007, “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [23] TS498, “Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1997.
- [24] URL-1: <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>, Erişim tarihi: 31.12.2018.
- [25] O. Doğan, Y. Genç, O.G. Odacıoğlu, “Betonarme Taşıyıcı Sistemlerin Depreme Dayanımlı Tasarımında Uyumlu Perde-Çerçeve Davranışı İçin Minimum Perde Oranının Belirlenmesi,” *Politeknik Dergisi*, pp.1-1, 2021.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur”

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”

Yazar Katkıları

Doğan: Çalışma konsepti ve tasarım, veri toplama, verilerin analizi ve yorumlanması, taslağın oluşturulması, revizyon.

Genç: Çalışma konsepti ve tasarım, veri toplama, verilerin analizi ve yorumlanması, taslağın oluşturulması, revizyon.

Akgül: Çalışma konsepti ve tasarım, taslağın oluşturulması, revizyon.



Makale Türü (Araştırma Makalesi)

Yeşil ve gri altyapı sistemlerinin bulanık analitik hiyerarşi prosesi yardımıyla karşılaştırmalı performans analizi

*Comparative performance analysis of green and gray infrastructure systems by means of the fuzzy analytical hierarchy process*Uğur Ünal¹, Dilek Eren Akyüz^{2*}¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ugurunal@ohu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1321-074X>² İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, dilekeren.akyuz@iuc.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4509-6897>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 24 Ocak 2022
Revizyon 19 Haziran 2022
Kabul 19 Haziran 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

Yağmur hendekleri,
sürdürülebilirlik, bulanık analitik
hiyerarşi prosesi

ÖZ

Kentsel bölgelerde kullanılan ve geçirimsiz yüzeylerden oluşan gri altyapı sistemleri birtakım kentsel sürdürülebilirlik problemlerine sebep olmaktadır. Dolayısıyla bu tür problemleri çözmek için gri altyapı sistemleri çözüm olamamakta ve daha farklı bir anlayışa ihtiyaç duyulmaktadır. Kentsel bölgelerin sürdürülebilirliğini sağlamak için yeşil altyapı gibi çevre dostu sistemlerin kullanımı son yıllarda dünyada da yaygınlaşan ve bu tür problemlerin çözümünde kullanılan uygulamalardır. Bu uygulamalar doğayı taklit ederek doğal kaynakların sürdürülebilir şekilde kullanımını sağlamaktadır. Bu çalışmanın amacı, yeşil ve gri altyapı sistemlerini kentsel bölgelerin sürdürülebilirliği açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirmek ve farklı sürdürülebilirlik göstergelerini temel alarak performans analizi yapmaktır. Dolayısıyla bu çalışmada yeşil altyapı sistemlerinden olan ıslak ve kuru yağmur hendeklerinin gri altyapı sistemleri ile Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (BAHP) kullanılarak karşılaştırılması yapılmış ve kentsel sürdürülebilirlik bakımından performansları değerlendirilmiştir. Karşılaştırma amacıyla sürdürülebilirliğin çevresel, sosyal ve ekonomik alt başlıklarında toplam 10 adet sürdürülebilirlik göstergesi ele alınmıştır. Her bir gösterge için literatür araştırmasına dayanan bulanık bir puanlama sistemi oluşturulmuş ve bu puanlar üçgensel bulanık sayıya dönüştürülerek BAHP’de gerekli işlemler yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen toplam bulanık öncelik ve durulaştırılmış öncelik tabloları incelendiğinde ıslak ve kuru yağmur hendeklerinin gri altyapı sistemlerine kıyasla kentsel sürdürülebilirlik açısından oldukça üstün bir performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuca göre kentsel bölgelerde gri altyapı sistemleri yerine yağmur hendekleri gibi yeşil altyapı uygulamalarının tercih edilmesi bu bölgelerin gelecek nesillere daha sağlıklı ve sürdürülebilir şekilde ulaşmasını sağlayacaktır. Dolayısıyla bu tür uygulamaların özellikle yoğun kentsel bölgelerde yaygınlaştırılması ve çevre bilimciler tarafından bölge yöneticilerinin bu konularda bilinçlendirilerek teşvik edilmesi gerekmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 January 2022
Received in revised form 19 June 2022
Accepted 19 June 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Swales, sustainability, fuzzy
analytic hierarchy process

Doi: 10.24012/dumf.1062145

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Gray infrastructure systems used in urban areas and impermeable surfaces cause some urban sustainability problems. Therefore, gray infrastructure systems no longer solve such problems, and a different understanding is needed. In order to ensure the sustainability of urban areas, the use of environmentally friendly systems such as green infrastructures have become widespread in the world in recent years and is used to solve such problems. These practices imitate nature and ensure the sustainable use of natural resources. This study aims to comparatively evaluate green and gray infrastructure systems in terms of urban areas' sustainability and make performance analyses based on different sustainability indicators. Therefore, in this study, wet and dry swales, which are green infrastructure systems, were compared with gray infrastructure systems using the Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP), and their performance in terms of urban sustainability was evaluated. For comparison purposes, a total of 10 sustainability indicators were discussed under the environmental, social, and economic subtitles of sustainability. A fuzzy scoring system based on literature research was created for each indicator, and these scores were converted into fuzzy triangular numbers. Necessary operations were made in FAHP, and the results were evaluated. When the total fuzzy priority and clarified priority tables are examined, it is observed that wet and dry swales have a superior performance in terms of urban sustainability compared to gray infrastructure systems. According to this result, the preference for green infrastructure applications such as swales instead of gray infrastructure systems in urban areas will ensure that these regions reach future generations healthier and more sustainable. Therefore, such practices should be widespread, especially in dense urban areas, and environmental scientists should encourage regional managers by raising awareness on these issues.

Giriş

Kırsal bölgelerin tersine kentsel alanlarda yoğun yapılaşmadan dolayı suyun yeraltına sızması geçirimsiz yüzey oranı arttığı için azaltılmaktadır. Bunun sonucu olarak kentsel bölgelerde hidrolojik döngünün elemanları bu durumdan olumsuz olarak etkilenmekte dolayısıyla doğal kaynakların sürdürülebilirliği istenildiği şekilde sağlanamamaktadır. Kentsel bölgelerdeki havza alanına ait geçirimsizlik yüzdesinin artması yüzeysel akış hacminin artmasına, sızma miktarının ve buharlaşma oranının ise azalmasına neden olmaktadır [1, 2]. Bu durum kentsel bölgelerde daha fazla sel ve taşkın olaylarının yaşanmasına [3], yeraltı su kaynaklarının yeterince beslenememesine ve buharlaşma oranının azalmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla kentsel bölgelerde hidrolojik döngü bozulmaktadır [4, 5]. Üstelik bu bölgelerde altyapı sistemi olarak kullanılan gri altyapı sistemleri de (borulu şebeke sistemleri ve beton kanallar gibi geçirimsiz yüzeylere sahip sistemler) bu sorunlara çözüm olamamaktadır.

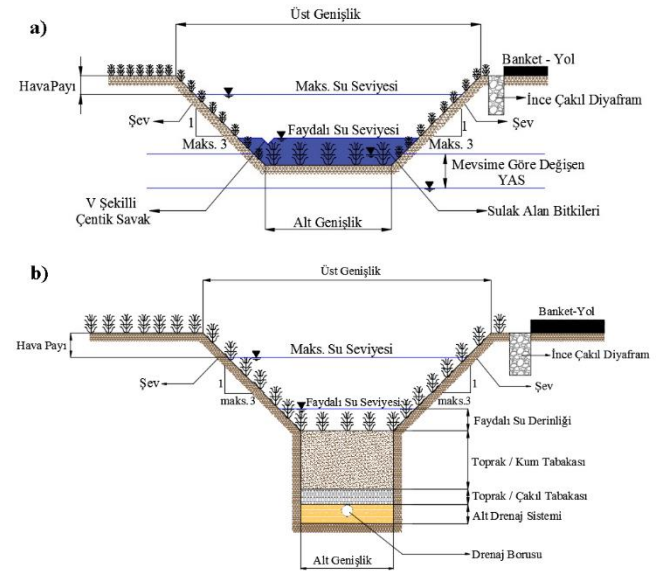
Kentsel bölgelerdeki bu durum, son yıllarda önemi anlaşılan ve yaygınlaşmaya başlayan yeşil altyapı uygulamaları ile çözülebilir. Bu uygulamalar geçirimsizlik yüzdesinin fazla olduğu kentsel bölgelerde sızma miktarının artmasına yardımcı olarak doğal kaynak olan sudan daha fazla yararlanmaya imkânı tanır [6]. Bununla birlikte su ve hava kalitesinin artmasına, sel ve taşkın olaylarının azalmasına, biyoçeşitliliğin artmasına/korunmasına, mikro iklimin düzenlenmesine ve bulunduğu bölgenin estetik değerinin gelişmesine de doğrudan veya dolaylı olarak katkı sağlar [7, 8]. Farklı amaçlar için tasarlanan yeşil altyapı uygulamaları genel olarak; yağmur hendekleri, yağmur bahçeleri, biyotutma hücreleri, sızma hendekleri, geçirgen yollar, süzme şeritleri, yeşil çatılar ve yağmur varilleri gibi çeşitli yağmur suyu yönetim uygulamalarından oluşmaktadır [9, 10]. Bu uygulamalardan yağmur hendekleri aşağıda açıklanan ve sürdürülebilirlik bakımından sahip oldukları avantajlarından dolayı bu çalışmada gri altyapı sistemleri ile karşılaştırmak üzere tercih edilmiştir.

Islak ve kuru olmak üzere temelde iki şekilde inşa edilen yağmur hendekleri, kırsal ve kentsel bölgelerde yağmur suyunu hasat etmek amacıyla kullanılmaktadırlar (Şekil 1). Literatürde bu hendekler üzerleri bitki örtüsüyle kaplanmış açık ve sığ kanallar olarak tanımlanmaktadır [13]. Çoğunlukla sulak alan olarak işlev gören ıslak yağmur hendekleri yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu suya doymuş bölgelere inşa edilmektedir [14, 15]. Islak yağmur hendeklerinin aksine kuru yağmur hendekleri ise genellikle yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olmadığı, suya doymuş olmayan bölgelere uygulanmaktadır [15].

Yağmur hendekleri kentsel bölgelerde yol kenarlarına, orta refüjlere, yerleşim yerlerine, otoparklara ve üniversitesi kampüs alanlarına; kırsal bölgelerde ise eş yükselti eğrilerine paralel olarak inşa edilmektedir [16, 17]. Bu hendekler sahip oldukları geçirimli yüzeyler ile yağmur suyunun sızmasına yardımcı olarak yüzeysel akış miktarını azaltır dolayısıyla kentsel bölgelerde sel ve taşkın olaylarının azalmasında etkili olurlar [12]. Yağmur hendeklerinin diğer avantajları ise aşağıda sıralanmıştır [11, 12].

- İnşa edileceği zeminin özelliğine göre ıslak ve kuru olarak inşa edilebilmeleri,
- Bakım, tasarım ve uygulamalarının kolay olması,
- Geniş alanlara inşa edilebilmeleri,
- Karayolu mühendisliği uygulamalarında özellikle yol kenarlarında drenaj amaçlı kullanılabilirmeleri,
- Ekosistemin sürdürülebilirliğine olumlu katkıların olması.

Bu faydalarının yanı sıra kırsal alanlarda inşa edilen yağmur hendekleri tarımsal sulama suyuna olan ihtiyacı da azaltmaktadır [18]. Yağmur hendekleri üzerinde bulunan bitki örtüsü sayesinde su kalitesinin artmasına ve yeraltına daha fazla temiz suyun sızmasına yardımcı olarak yeraltı su kaynaklarının hem beslenmesine hem de temizlenmesine yardımcı olmaktadır. Yağmur hendekleri kentsel bölgelerin sürdürülebilirliği için pek çok avantajlara sahiptir. Tüm bu avantajlarından dolayı yağmur hendeklerinin özellikle yoğun kentsel alanlarda yaygınlaştırılması tavsiye edilmektedir [19]. Bu yüzden, bu çalışma için kentsel bölgelerde yeşil altyapı sistemlerini temsilen karşılaştırılmada kullanılmak üzere yağmur hendekleri seçilmiştir.



Şekil 1. Trapez en kesitli a) ıslak yağmur hendeği b) kuru yağmur hendeği.

Bu çalışmanın amacı, yeşil ve gri altyapı sistemlerini sürdürülebilirlik açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirmek ve farklı sürdürülebilirlik göstergelerine göre performans analizi yapmaktır. Sürdürülebilirlik açısından ıslak/kuru yağmur hendeklerinin gri altyapı sistemlerine göre daha sürdürülebilir olup olmadığının dilsel değişkenlere yer verebilen, birden çok faktör/alt faktörü değerlendirebilen, cevapların bulanık olabileceği ve hiyerarşik bir yapı oluşturan bulanık mantık ve analitik hiyerarşi prosesinin (AHP) birleşiminden oluşan bulanık analitik hiyerarşi prosesi (BAHP) ile değerlendirilmiştir. Böylece sayısal olarak üç ana başlık (çevresel, sosyal ve ekonomik ana başlıkları ve toplam 10 gösterge) altında sürdürülebilirlik performansları belirlenerek hendeklerin gri altyapı sistemlerine olan

üstünlük veya zayıflıkları puan sistemine göre belirlenmiştir. Performans analizinden elde edilen sonuçlar, kentlerin sürdürülebilir tasarımı açısından karar vericilere yol gösterici olabilir.

Materyal ve yöntem

Bu bölümde öncelikle bulanık analitik hiyerarşi prosesinin (BAHP) temelini oluşturan bulanık mantık ve analitik hiyerarşi prosesinin gelişim ve işlem aşamaları, daha sonra ise BAHP yönteminin algoritması açıklanmaktadır.

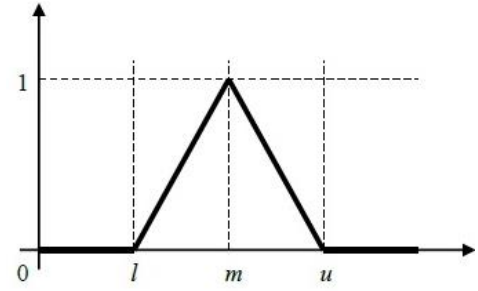
Bulanık Mantık

Bulanık mantık belirsizlikleri tanımlamak için geliştirilmiş bir mantık türüdür. Klasik (geleneksel) mantık bir durumun veya olayın ikili mantık sistemi yani 0 (hiç/yok) veya 1 (hep/tam var) olması haliyle ilgilenirken bulanık mantık bu değerlerin arasında da olabileceğini varsayarak ara durumlarla da ilgilenir. Yani bulanık mantıkta sadece siyah veya sadece beyaz yoktur bu renkler arasındaki gri tonlar da vardır ve bunları da dikkate alır [20]. Bulanık mantık belirsizlik durumlarında çok değerli mantık ile akıl yürütmenin birleştirilmesine dayanmaktadır ve ilk olarak Zadeh [21] tarafından ortaya atılmıştır. Çok değerli mantık ise geleneksel kümelerden meydana gelen önermelerin ikiden fazla doğruluk değeri ile eşleştirilebildiği mantık sistemi olarak tanımlanmaktadır [22].

Bulanık mantık kavramı, önermenin doğruluğunun kesin yanlış (0) veya kesin doğru (1) arasındaki sonsuz sayıdaki doğruluk değerlerini içeren bir kümenin fonksiyonu olarak tanımlanabilir [23]. Dolayısıyla bulanık mantıkta doğru veya yanlış gibi kesin ifadelerin yerine düşük, orta, yüksek gibi ifadeler kullanılabilir [24]. Dolayısıyla bulanık mantık net bir şekilde ifade edilemeyen kavramları yaklaşık olarak nitelendirilebilmesine ve sözel ifadeler şeklinde kullanımına imkân tanır [25]. Bu özelliğiyle bulanık mantık sözel değişkenleri matematiksel olarak ifade edebilmek amacıyla kullanılmaktadır.

Bulanık kümeler 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecelerine sahiptir. 0 ile 1 arasındaki değişimin değerine üyelik derecesi, üyelik derecesinin alt küme içerisindeki değişimine ise üyelik fonksiyonu denmektedir [26]. Bir A kümesinin üyelik fonksiyonu $\mu_A(x)$ ile gösterilir ve faktörün kümeye üyeliği 0 ile 1 arasında değerler alır. Faktör kümeye kesinlikle ait ise $\mu_A(x)=1$ değilse $\mu_A(x)=0$ 'dır. Bulanık kümelerde işlemler yamuksal veya üçgensel bulanık sayılara göre yapılır. Bu çalışmada işlem kolaylığı olması açısından üçgensel bulanık sayılarla çalışılmıştır. Üçgensel bulanık sayılar (\tilde{A}); l, m, u gibi üç gerçek sayı ile ifade edilir ve üyelik fonksiyonları bu sayılara bağlı olarak tanımlanır. Burada l ve u sırasıyla bulanıklığın en küçük ve en büyük değerini m ise en olası değeri göstermektedir. Üçgensel bulanık sayıların üyelik fonksiyonu Denklem (1) ile tanımlanmaktadır ve grafiği Şekil 2'de verilmektedir.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < l \text{ veya } x > u \\ \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m}, & m \leq x \leq u. \end{cases} \quad (1)$$



Şekil 2. Üçgensel bulanık sayı.

Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

İlk defa Myers ve Alpert [27] tarafından kullanılan Analitik hiyerarşi prosesi (AHP), Saaty [28] tarafından geliştirilmiş çok kriterli karar verme tekniklerinden biridir [29]. AHP'yi diğer çok kriterli karar verme tekniklerinden ayıran özelliği; çok kriterli ve karmaşık problemleri nicel ve nitel değişkenleri bir arada kullanarak hiyerarşik bir yapı oluşturması olarak ifade edilebilir [30]. Bu yöntem, gereksiz matematiksel işlemleri azaltarak kriter ve/veya alternatiflerin ikili olarak karşılaştırılmasından elde edilen öncelik değerlerine göre ölçüm yapar ve uygulaması daha kolaydır [31, 32].

AHP'de öncelikle ulaşılmak istenen hedef doğrultusunda faktör ve alt faktörlerin belirlenip hiyerarşik yapının oluşturulması gerekmektedir. Hiyerarşik yapının ardından her faktör için alternatiflerin değerlendirilmesi ve faktörlerin ağırlıklarının (önem derecelerinin) belirlenmesi amacıyla ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur. İkili karşılaştırma matrisleri oluşturulurken Tablo 1'de verilen ve Saaty [33], tarafından önerilen değeri 1 ile 9 arasında değişen önem skalası tablosu kullanılır.

Bir sonraki işlem adımında öncelik veya ağırlık vektörlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu aşamada, karşılaştırma matrisinin özdeğer ve özvektörleri öncelik sırasını belirleme amacıyla kullanılabilir. Buna göre en büyük özdeğere karşılık gelen özvektör önceliği belirlemektedir.

AHP'nin son aşaması ise alternatiflerin öncelik değerlerinin hesaplanmasıdır. Bunun için faktörlerin önem ağırlıkları ile alternatiflerin önem ağırlıklarının çarpılması gerekir. Bu işlem sonucunda her bir alternatif için öncelik değeri elde edilir. Bu hesap sonucunda en büyük önceliğe sahip değer en iyi durum olarak seçilir.

Tablo 1. Önem skalası [33].

Önem Değeri	Tanım
1	Eşit Derecede Önemli
3	Biraz Önemli
5	Fazla Önemli
7	Çok Fazla Önemli
9	Aşırı Derecede Önemli
2,4,6,8	Ara Değerler

Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (BAHP) ve Algoritması

AHP yöntemi pek çok alanda kullanılmasına rağmen belirsizlik durumlarını dikkate almadığı için eleştirilmektedir

[24, 34]. Bu durumu ortadan kaldırmak ve her durumda AHP yönteminin kullanımını arttırmak için bu yöntemi bulanık mantık ile birleştirilerek bulanık analitik hiyerarşi prosesi (BAHP) kullanılmaya başlanmıştır [20]. Bulanık sayıları literatürde ikili karşılaştırma amacıyla kullanan ilk çalışmalar Van Laarhoven ve Pedrycz [35] ve takiben Burckley [36] tarafından yapılmıştır. Öncü bu çalışmalardan sonra bu alanda yapılan çalışmalar artmıştır.

BAHP'nin algoritması aşağıda basamak sırasına göre açıklanmaktadır.

i) Öncelikle AHP'nin hiyerarşik yapısını oluşturmak amacıyla faktör ve alt faktörler belirlenir. Daha sonra ikili karşılaştırma matrisleri oluşturularak faktör ve alt faktörlerin ağırlıkları hesaplanır. Sonrasında bulanık geometrik ortalama yöntemiyle faktör ve alt faktörlerin bulanık ağırlıkları belirlenir. Bulanık ağırlıklar belirlenirken Saaty [28] tarafından önerilen önem skalası değerleri Prakash [37] tarafından geliştirilen üçgensel bulanık sayılar ile birlikte kullanılır. Faktörlerin karşılaştırılması esnasında kullanılan bulanık sayılar Tablo 2'de verilmektedir.

ii) Sonraki aşamada alt faktörlerin global bulanık ağırlıkları hesaplanır. Bu hesap için alt faktörün ait olduğu faktörün bulanık ağırlığı ile alt faktörün bulanık ağırlığı çarpılır.

iii) Global ağırlıkların belirlenmesinden sonra yağmur hendekleri ve gri altyapı sistemlerine ait bulanık öncelik değerleri belirlenir. Bu çalışmada yağmur hendekleri ile gri altyapı sistemlerini değerlendirmek için Chan vd., [38] tarafından geliştirilen dilsel değişkenler ve bu değişkenlere karşılık gelen üçgensel bulanık sayılar dikkate alınmıştır. Bulanık öncelik değerlerinin belirlenmesinin ardından alt faktör bulanık ağırlıklarının toplanmasıyla yağmur hendekleri ve gri alt yapı sistemleri için toplam bulanık öncelik değerleri hesaplanır. Chan vd., [38] tarafından önerilen bulanık değerlendirme tablosu Tablo 3'te verilmektedir.

iv) Son aşamada toplam bulanık öncelik değerlerinin durulaştırılması işlemi yapılır. Durulaştırma işlemi için α kesme yöntemi uygulanır. Bu yöntemde öncelikle farklı α kesme değerleri için alt ve üst sınırlar belirlenir. α kesme değeri 0 ile 1 arasında değerler alır. Alt ve üst sınırlar ise Denklemler (2) ve (3) ile hesaplanır.

Daha sonra Denklemler (4) ve (5) ile birleştirilmiş alt ve üst sınır öncelik değerleri belirlenir. Son olarak yağmur hendekleri ve gri altyapı sistemleri için λ iyimserlik indeksine göre Denklem (6) ile durulaştırılmış öncelik değerleri hesaplanır. λ iyimserlik indeksinin 0 olması durumu karar vericinin kötümser, 0.5 olması durumu ılımlı ve 1 olması durumu ise iyimser olduğunu göstermektedir. Elde edilen toplam bulanık öncelik ve durulaştırılmış öncelik değerlerine göre faktörlerin (yağmur hendekleri ve gri altyapı sistemleri) sıralaması yapılır. İstenirse durulaştırılmış değerlere normalizasyon işlemi yapılarak da faktörlerin yüzdesel olarak sıralaması yapılabilir.

$$\text{Alt Sınır (A.S.)} = \alpha * (m-l) + l \quad (2)$$

$$\text{Üst Sınır (Ü.S.)} = \alpha * (u-m) + l \quad (3)$$

$$W_{A0} = \frac{\sum_{i=1}^l \alpha_i * (A.S.)_i}{\sum_{i=1}^l \alpha_i} \quad (4)$$

$$W_{Ü0} = \frac{\sum_{i=1}^l \alpha_i * (Ü.S.)_i}{\sum_{i=1}^l \alpha_i} \quad (5)$$

$$W_{D0} = \lambda * W_{Ü0} + (1 - \lambda) * W_{A0} \quad (6)$$

Burada; W_{A0} : alt sınır öncelik değerini, $W_{Ü0}$: üst sınır öncelik değerlerini, W_{D0} : durulaştırılmış öncelik değerlerini, λ : [0 - 1] aralığındaki iyimserlik indeksini göstermektedir.

Tablo 2. Faktörlerin karşılaştırılmasında kullanılan bulanık sayılar [37].

1-9 Önem Skalası	Bulanık Sayılar	1-9 Önem Skalasının Tersisi	Bulanık Sayıların Tersisi
1	(1, 1, 1)	1/1	(1/1, 1/1, 1/1)
2	(1, 2, 4)	1/2	(1/4, 1/2, 1/1)
3	(1, 3, 5)	1/3	(1/5, 1/3, 1/1)
5	(3, 5, 7)	1/5	(1/7, 1/5, 1/3)
7	(5, 7, 9)	1/7	(1/9, 1/7, 1/5)
9	(7, 9, 11)	1/9	(1/11, 1/9, 1/7)

Tablo 3. Bulanık değerlendirme tablosu [38].

Dilsel Değişken	Üçgensel Bulanık Sayı
Çok İyi (Çİ)	(3, 5, 5)
İyi (İ)	(1, 3, 5)
Orta (O)	(1, 1, 1)
Düşük (D)	(1/5, 1/3, 1)
Çok Düşük (ÇD)	(1/5, 1/5, 1/3)

Yeşil ve gri altyapı sistemlerinin BAHP yöntemi kullanılarak karşılaştırılması

Sürdürülebilirlik temelde çevresel, sosyal ve ekonomik olmak üzere üç alt başlıklar altında toplanmaktadır [39]. Bu çalışmada da yeşil altyapı uygulaması yağmur hendeklerinin ve gri altyapı sistemlerinin kentsel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesinde bu üç alt başlıklar göz önüne alınarak gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır.

Bulgular

Bu bölümde BAHP yöntemine göre bir yeşil altyapı uygulaması olan yağmur hendekleri (ıslak ve kuru) ile gri altyapı sistemlerinin karşılaştırılması yapılmakta ve elde edilen sonuçlar yorumlanmaktadır.

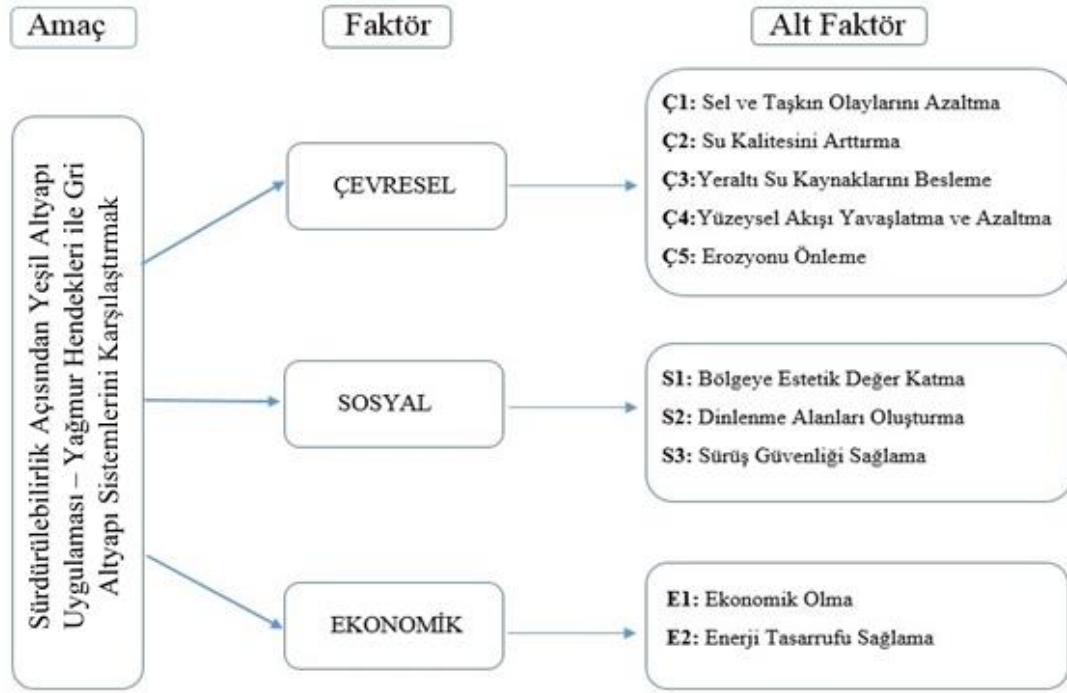
BAHP yöntemi ile altyapı sistemlerinin karşılaştırılması

Karşılaştırma için öncelikle çevresel: 5, sosyal: 3 ve ekonomik: 2 olmak üzere toplam 10 adet sürdürülebilirlik göstergesi dikkate alınmış ve her bir gösterge için literatür araştırması yapılarak bulanık bir puanlama sistemi oluşturulmuştur. Oluşturulan bulanık puanlama sistemi ve literatür araştırması Tablo 4'te ve belirlenen amaç, faktör ve alt faktörler (sürdürülebilirlik göstergeleri) ise Şekil 3'te verilmektedir.

Daha sonra Tablo 5'te belirtilen faktör ve alt faktörlerin kendi aralarındaki ikili karşılaştırmaları Tablo 1'deki önem skalası değerleri dikkate alınarak Tablo 2'ye göre yapılmış ve bulanık ağırlıklar hesaplanmıştır (Tablo 6 - Tablo 8). Faktör ve alt faktörlerin bulanık ağırlıkları hesaplandıktan sonra alt faktörlerin global bulanık ağırlıkları elde edilmiştir (Tablo 9).

Elde edilen global ağırlıklar Tablo 3'te verilen dilsel değişkenlere karşılık gelen üçgensel bulanık sayılarla çarpılarak ıslak ve kuru yağmur hendekleri ile gri altyapı sistemlerinin toplam bulanık öncelik değerleri hesaplanmıştır

(Tablo 10 ve 12). Bu aşamadan sonra α kesme yöntemiyle durulaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Burada λ iyimserlik indeksi 0.5 (ılımlı karar verici) alınarak Denklem 6'ya göre durulaştırılmış öncelik değerleri hesaplanmıştır (Tablo 13).



Şekil 3. Amaç, faktör ve alt faktörler.

Tablo 4. Bulanık puanlama sistemi ve literatür araştırması.

	Islak Yağmur Hendeği		Kuru Yağmur Hendeği		Gri Altyapı Sistemleri	
	Bulanık Puan	Kaynak	Bulanık Puan	Kaynak	Bulanık Puan	Kaynak
Ç1	(O)	[40] ¹	(İ)	[50]	(D)	[53] ¹
Ç2	(O)	[41, 42] ²	(O)	[41, 50]	(ÇD)	[54, 55] ¹
Ç3	(D)	[41, 43] ²	(O)	[41, 50, 51]	(ÇD)	[54, 56] ¹
Ç4	(İ)	[15] ²	(İ)	[45, 50]	(ÇD)	*
Ç5	(İ)	[40, 44] ¹	(O)	[50, 51]	(ÇD)	[57] ¹
S1	(D)	[41, 45] ²	(O)	[45, 51]	(ÇD)	*
S2	(ÇD)	[46] ¹	(ÇD)	[50]	(ÇD)	*
S3	(O)	[17] ¹	(İ)	[17] ¹	(D)	*
E1	(O)	[47]	(O)	[50, 51]	(ÇD)	[54] ¹
E2	(İ)	[48, 49] ¹	(Çİ)	[49, 52] ¹	(ÇD)	[53, 58] ¹

Tablo 5. Faktörlere ait ikili karşılaştırma matrisleri ve hesaplanan bulanık ağırlık değerleri.

Faktörler	ÇF	SF	EF	Bulanık Ağırlıklar
Çevresel Faktörler (ÇF)	(1, 1, 1)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(0.375, 0.700, 1.258)
Sosyal Faktörler (SF)	(1/7, 1/5, 1/3)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(0.0942, 0.202, 0.407)
Ekonomik Faktörler (EF)	(1/7, 1/5, 1/3)	(1/5, 1/3, 1)	(1, 1, 1)	(0.0552, 0.0971, 0.238)

¹ Puanlama ilgili makale/rapor/tez dikkate alınarak yazarlar tarafından yapılmıştır.

² Puanlama sulak alan özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır.

*Yazarların fikir ve görüşleri doğrultusunda puanlama yapılmıştır.

(ÇD) Çok Düşük, (D) Düşük, (O) Orta, (İ) İyi, (Çİ) Çok İyi.

Tablo 6. Çevresel alt faktörlere ait ikili karşılaştırma matrisi.

Çevresel (Ç) Faktör	Ç1	Ç2	Ç3	Ç4	Ç5	Bulanık Ağırlıklar
Ç1	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(1.000, 1.552, 1.904)
Ç2	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(1.246, 2.141, 2.809)
Ç3	(1/5, 1/3, 1)	(1/5, 1/3, 1)	(1, 1, 1)	(1/5, 1/3, 1)	(1, 3, 5)	(0.381, 0.644, 1.380)
Ç4	(1, 1, 1)	(1/5, 1/3, 1)	(1, 3, 5)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(0.725, 1.246, 1.904)
Ç5	(1/5, 1/3, 1)	(1/7, 1/5, 1/3)	(1/5, 1/3, 1)	(1/5, 1/3, 1)	(1, 1, 1)	(0.258, 0.375, 0.803)

Tablo 7. Sosyal alt faktörlere ait ikili karşılaştırma matrisi.

Sosyal (S) Faktör	S1	S2	S3	Bulanık Ağırlıklar
S1	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1/5, 1/3, 1)	(0.725, 0.693, 1.000)
S2	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1/5, 1/3, 1)	(0.725, 0.693, 1.000)
S3	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(1, 1, 1)	(1.000, 2.080, 1.904)

Tablo 8. Ekonomik alt faktörlere ait ikili karşılaştırma matrisi.

Ekonomik (E) Faktör	E1	E2	Bulanık Ağırlıklar
E1	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(1.000, 1.732, 2.236)
E2	(1/5, 1/3, 1)	(1, 1, 1)	(0.447, 0.577, 1.000)

Tablo 9. Alt faktörlerin global ağırlıkları

Faktörler ve Bulanık Ağırlıklar	Alt Faktörler ve Bulanık Ağırlıklar	Alt Faktörlerin Global Bulanık Ağırlıkları
Çevresel Faktörler (0.375, 0.700, 1.258)	Ç1 (1.000, 1.552, 1.904)	(0.375, 1.086, 2.395)
	Ç2 (1.246, 2.141, 2.809)	(0.467, 1.499, 3.534)
	Ç3 (0.381, 0.644, 1.380)	(0.143, 0.451, 1.736)
	Ç4 (0.725, 1.246, 1.904)	(0.272, 0.872, 2.395)
	Ç5 (0.258, 0.375, 0.803)	(0.097, 0.263, 1.010)
Sosyal Faktörler (0.0942, 0.202, 0.407)	S1 (0.725, 0.693, 1.000)	(0.068, 0.140, 0.407)
	S2 (0.725, 0.693, 1.000)	(0.068, 0.140, 0.407)
	S3 (1.000, 2.080, 1.904)	(0.094, 0.420, 0.775)
Ekonomik Faktörler (0.0552, 0.0971, 0.238)	E1 (1.000, 1.732, 2.236)	(0.055, 0.168, 0.532)
	E2 (0.447, 0.577, 1.000)	(0.025, 0.056, 0.238)

Tablo 10. Islak yağmur hendeği için toplam bulanık öncelik değerleri.

Alt Faktörler	Global Bulanık Ağırlık	Islak Yağmur Hendeği		
		Dilsel Değişken	Üçgensel Bulanık Sayı	Ağırlık
Ç1	(0.375, 1.086, 2.395)	(O)	(1, 1, 1)	(0.375, 1.086, 2.395)
Ç2	(0.467, 1.499, 3.534)	(O)	(1, 1, 1)	(0.467, 1.499, 3.534)
Ç3	(0.143, 0.451, 1.736)	(D)	(1/5, 1/3, 1)	(0.029, 0.150, 1.736)
Ç4	(0.272, 0.872, 2.395)	(İ)	(1, 3, 5)	(0.272, 2.616, 11.975)
Ç5	(0.097, 0.263, 1.010)	(İ)	(1, 3, 5)	(0.097, 0.789, 5.050)
S1	(0.068, 0.140, 0.407)	(D)	(1/5, 1/3, 1)	(0.014, 0.047, 0.407)
S2	(0.068, 0.140, 0.407)	(ÇD)	(1/5, 1/5, 1/3)	(0.014, 0.028, 0.136)
S3	(0.094, 0.420, 0.775)	(O)	(1, 1, 1)	(0.094, 0.420, 0.775)
E1	(0.055, 0.168, 0.532)	(O)	(1, 1, 1)	(0.055, 0.168, 0.532)
E2	(0.025, 0.056, 0.238)	(İ)	(1, 3, 5)	(0.025, 0.168, 1.190)
Toplam Bulanık Öncelik				(1.442, 6.971, 27.730)

Tablo 11. Kuru yağmur hendeği için toplam bulanık öncelik değerleri.

Alt Faktörler	Global Bulanık Ağırlık	Kuru Yağmur Hendeği		
		Dilsel Değişken	Bulanık Sayı	Ağırlık
Ç1	(0.375, 1.086, 2.395)	(İ)	(1, 3, 5)	(0.375, 3.258, 11.975)
Ç2	(0.467, 1.499, 3.534)	(O)	(1, 1, 1)	(0.467, 1.499, 3.534)
Ç3	(0.143, 0.451, 1.736)	(O)	(1, 1, 1)	(0.143, 0.451, 1.736)
Ç4	(0.272, 0.872, 2.395)	(İ)	(1, 3, 5)	(0.272, 2.616, 11.975)
Ç5	(0.097, 0.263, 1.010)	(O)	(1, 1, 1)	(0.097, 0.263, 1.010)
S1	(0.068, 0.140, 0.407)	(O)	(1, 1, 1)	(0.068, 0.140, 0.407)
S2	(0.068, 0.140, 0.407)	(ÇD)	(1/5, 1/3, 1)	(0.014, 0.047, 0.407)
S3	(0.094, 0.420, 0.775)	(İ)	(1, 3, 5)	(0.094, 1.260, 3.875)
E1	(0.055, 0.168, 0.532)	(O)	(1, 1, 1)	(0.055, 0.168, 0.532)
E2	(0.025, 0.056, 0.238)	(Çİ)	(3, 5, 5)	(0.075, 0.280, 1.190)
Toplam Bulanık Öncelik				(1.660, 9.982, 36.641)

Tablo 12. Gri altyapı sistemleri için toplam bulanık öncelik değerleri.

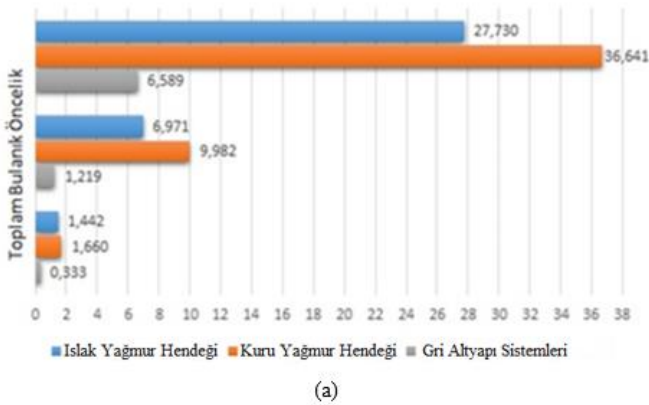
Alt Faktörler	Global Bulanık Ağırlık	Gri Altyapı Sistemleri		
		Dilsel Değişken	Üçgensel Bulanık Sayı	Ağırlık
Ç1	(0.375, 1.086, 2.395)	(D)	(1/5, 1/3, 1)	(0.075, 0.362, 2.395)
Ç2	(0.467, 1.499, 3.534)	(ÇD)	(1/5, 1/5, 1/3)	(0.093, 0.299, 1.178)
Ç3	(0.143, 0.451, 1.736)	(ÇD)	(1/5, 1/5, 1/3)	(0.029, 0.090, 0.579)
Ç4	(0.272, 0.872, 2.395)	(ÇD)	(1/5, 1/5, 1/3)	(0.054, 0.174, 0.798)
Ç5	(0.097, 0.263, 1.010)	(ÇD)	(1/5, 1/5, 1/3)	(0.019, 0.053, 0.336)
S1	(0.068, 0.140, 0.407)	(ÇD)	(1/5, 1/5, 1/3)	(0.014, 0.028, 0.136)
S2	(0.068, 0.140, 0.407)	(ÇD)	(1/5, 1/5, 1/3)	(0.014, 0.028, 0.136)
S3	(0.094, 0.420, 0.775)	(D)	(1/5, 1/3, 1)	(0.019, 0.140, 0.775)
E1	(0.055, 0.168, 0.532)	(ÇD)	(1/5, 1/5, 1/3)	(0.011, 0.034, 0.177)
E2	(0.025, 0.056, 0.238)	(ÇD)	(1/5, 1/5, 1/3)	(0.005, 0.011, 0.079)
Toplam Bulanık Öncelik				(0.333, 1.219, 6.589)

Tablo 13. Durulaştırılmış değerler.

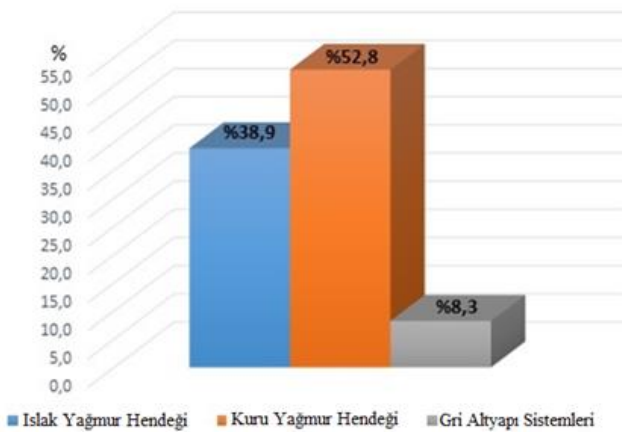
Islak Yağmur Hendeği									
α kesmesi	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Alt Sınır	1.9949	2.5478	3.1007	3.6536	4.2065	4.7594	5.3123	5.8652	6.4181
Üst Sınır	26.7091	24.6762	22.6433	20.6104	18.5775	16.5446	14.5117	12.4788	10.4459
$W_{IDA} = 4.944, W_{IDÜ} = 15.867, W_{IDÖ} = 10.405$									
Kuru Yağmur Hendeği									
α kesmesi	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Alt Sınır	2.4922	3.3244	4.1566	4.9888	5.821	6.6532	7.4854	8.3176	9.1498
Üst Sınır	35.4272	32.7844	30.1416	27.4988	24.856	22.2132	19.5704	16.9276	14.2848
$W_{KDA} = 6.931, W_{KDÜ} = 21.332, W_{KDÖ} = 14.131$									
Gri Altyapı Sistemleri									
α kesmesi	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Alt Sınır	0.4216	0.5102	0.5988	0.6874	0.776	0.8646	0.9532	1.0418	1.1304
Üst Sınır	6.385	5.848	5.311	4.774	4.237	3.7	3.163	2.626	2.089
$W_{GDA} = 0.894, W_{GDÜ} = 3.521, W_{GDÖ} = 2.208$									

Tablolarda, WIDA: ıslak yağmur hendeği durulaştırılmış alt sınırı, WIDÜ: ıslak yağmur hendeği durulaştırılmış üst sınırı, WIDÖ: ıslak yağmur hendeği durulaştırılmış öncelik değerini, WKDA: kuru yağmur hendeği durulaştırılmış alt sınırı, WKDÜ: kuru yağmur hendeği durulaştırılmış üst sınırı, WKDÖ: kuru yağmur hendeği durulaştırılmış öncelik değerini, WGDA: gri altyapı sistemleri durulaştırılmış alt sınırı, WGDÜ: gri altyapı sistemleri durulaştırılmış üst sınırı, WGDÖ: gri altyapı sistemleri durulaştırılmış öncelik değerini ifade etmektedir.

Hesaplamalar sonucunda elde edilen toplam bulanık öncelik değerlerine ait grafik Şekil 4a'da ve durulaştırılmış öncelik değerlerinin normalleştirilmesiyle elde edilen normalleştirilmiş yüzde öncelik değerleri ise Şekil 4b'de verilmektedir. Bu grafiklere göre yağmur hendeklerinin gri altyapı sistemlerden sürdürülebilirlik açısından daha iyi bir performans sergilediği net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca yine aynı grafiklerden kuru yağmur hendeklerinin ıslak yağmur hendeklerinden az farkla daha üstün olduğu anlaşılmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4. Yağmur hendekleri ve gri altyapı sistemleri için a) toplam bulanık öncelik b) normalleştirilmiş yüzde öncelik değerleri.

Tartışma ve sonuçlar

Bu çalışmada kullanılan BAHP, karar vericinin net bir şekilde doğru veya yanlış gibi söylemler yerine kısmen doğru,

kısmen yanlış, güçlü bir şekilde doğru veya yanlış şeklinde daha bulanık kararlar verebilmesine imkân tanımaktadır. Aynı zamanda bir hiyerarşi oluşturarak kriterlerin kendi arasında karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla en iyi alternatifin seçilmesinde kullanılan rasyonel, kullanışlı ve kullanımı kolay bir yöntemdir [59]. Bu yöntem çoğunlukla iktisadi ve idari bilimlerle diğer sosyal bilimlere ait araştırmalarda en iyi seçeneğin seçilmesi veya seçenekler arasında sıralama yapılması amacıyla kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise yeşil ve gri altyapı sistemlerinin sürdürülebilirlik performanslarının değerlendirilmesi amacıyla kullanılarak fen bilimleri gibi farklı bir alandaki yeterliliği araştırılmış ve açık net şekilde gri altyapılarına göre hendeklerin daha sürdürülebilir olduğu gösterilmiştir.

Yeşil altyapı uygulaması olan yağmur hendekleri ile gri altyapı sistemlerinin sürdürülebilirlik açısından karşılaştırılmasında toplam bulanık öncelik değerleri (düşük-orta-yüksek) düşünüldüğünde her üç değer için de yağmur hendeklerinin gri altyapı sistemlerinden belirgin bir şekilde ön planda olduğu bulunmuştur (Tablo 12 ve Şekil 4a). Tablo 13'te verilen durulaştırılmış öncelik değerleri, Şekil 4b'deki normalleştirilmiş yüzde öncelik değerlerine dönüştürüldüğünde fark daha da netleşmiştir. Bu değerlere göre kuru yağmur hendekleri değerlendirilen alt faktörler dikkate alındığında %52,8 oranında sürdürülebilirliğe katkı sağlarken ıslak yağmur hendekleri %38,9 oranında sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır. Buna rağmen gri altyapı sistemlerinin kentsel sürdürülebilirliğe olan katkısı ise sadece %8,3 oranındadır. Dolayısıyla bu çalışma ile hem ıslak hem de kuru yağmur hendeklerinin gri altyapı sistemlerine göre sürdürülebilirlik bakımından daha üstün bir performansla sahip olduğu bulunmuştur. Gri altyapı sistemleri ile yağmur hendekleri arasındaki fark beklenen sonuç olmasına rağmen kuru ve ıslak yağmur hendekleri arasındaki fark önemlidir. Bunun en önemli sebebi kuru yağmur hendeklerinin şehir içindeki kullanım alanlarının fazla olması ve içerisindeki suyu altyapı sistemine aktarabilmesidir.

Gri ve yeşil altyapı sistemlerinin hem toplam bulanık hem de normalleştirilmiş yüzdesel öncelik değerlerine göre, karar vericiler kentsel bölgelerde öncelikle kuru yağmur hendeklerini, eğer bu hendekler için uygun zemin ortamı mevcut değilse ikincil olarak ıslak yağmur hendeklerinin inşa etmeleri gerekmektedir. Bunu yanın sıra gri sistemlerin sürdürülebilirliğin yaklaşık 4,5 katı kadar sürdürülebilir olan hendeklerin kullanımının artırılması ve kentsel bölgelerde mevcut durumda kullanılan gri altyapı sistemlerinin yeşil altyapı sistemleri ile yer değiştirmesi gerektiğini göstermektedir. En azından yeşil ve gri altyapı sistemlerinin birlikte kullanılması (bütünleşik altyapı sistemi) sürdürülebilirlik için gerekli olduğu ortaya çıkarmaktadır [60].

Kuru ve ıslak yağmur hendekleri kullanılarak kentleşme sonucu artan geçirimsiz yüzeylerin olumsuz etkileri örneğin sel ve taşkın olaylarının gözlemlenmesi, su kalitesinin bozulması, yeraltı su kaynaklarının yeterince beslenememesi, bölgenin estetik değerinin ve dinlenme alanlarının azalması ve enerji kaybı gibi sorunlar hafifletilebilir. Bu uygulamaların kentlerin sürdürülebilirliğine olumlu katkılar sağladığı yapılan bilimsel çalışmalarla kanıtlanmıştır [61, 62].

Dolayısıyla ülkemizde de bu tarz uygulamaların artması gelecek nesillerin daha sağlıklı bir ortamda yaşamaları için zemin hazırlayacaktır.

Kullanılan 5 çevresel, 3 sosyal ve 2 ekonomik alt faktörlere göre yapılan değerlendirmelerde en büyük puana sahip kuru yağmur hendeğinin çıkması bu hendeğin faydalarının yanında kullanım alanının da geniş olması sebebi ile sürdürülebilir şehirler için ilk başvurulacak yeşil altyapı haline getirmektedir. Bu çalışmada sadece yağmur hendekleri kıyaslandığı için diğer yeşil altyapı sistemleri kıyaslanmadığından birbirlerine göre üstünlükleri net olmamasına rağmen gri altyapıya olan üstünlüğü açık şekilde ortaya konulmuştur. Bu yüzden klasik yöntemlerden uzaklaşılması gerekmektedir.

Yeşil altyapı uygulamalarında biri olan yağmur hendeklerinin ülkemizdeki uygulama alanlarının artmasıyla kentsel sürdürülebilirliğe olumlu katkılar sağlanacağı ve yağmur suyundan daha fazla yararlanma imkânı doğacağı açıktır. Dolayısıyla bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında yağmur hendeklerinin özellikle kentsel bölgelerde kullanımının yaygınlaştırılması sürdürülebilirlik açısından fayda sağlayacağı açıktır.

Yazarların Katkısı: Makale 1. yazar tarafından gerekli hesaplamalar/araştırmalar yapılarak yazılmış ve 2. Yazarın danışmanlığında tasarlanarak eleştirel olarak incelenip revize edilmiştir.

Etik kurul izni: Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Çıkar Çatışması: Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1] D. Butler, and J. W. Davies, "Urban drainage," 2nd edition, Spon Press Taylor & Francis Group, London and New York. 2004.
- [2] V. Müftüoğlu, ve H. Perçin, "Sürdürülebilir kentsel yağmur suyu yönetimi kapsamında yağmur bahçesi," İnönü Üniversitesi Sanat ve Tasarım Dergisi, vol. 5, no. 11, pp. 27-37, 2015.
- [3] M.S. Foomani, and B. Malekmohammadi, "Site selection of sustainable urban drainage systems using fuzzy logic and multi-criteria decision-making." *Water and Environment Journal*, vol. 34, pp. 584-599, 2020.
- [4] G. Lindh, "Urbanization: A hydrological headache," Springer, vol. 1, no. 6, pp. 185-201, 1972.
- [5] Q. Zeng, L. Hao, X. Huang, L. Sun, and G. Sun, "Effects of urbanization on watershed evapotranspiration and its components in Southern China," *Water*, vol. 12, no. 645, pp. 1-23, 2020.
- [6] M.E. Dietz, and C.L. Arnold, "Can green infrastructure provide both water quality and flood reduction benefits," *Journal of Sustainable Water Built Environment*, vol. 4, no. 2, 2018.
- [7] Y. Bai, N. Zhao, R. Zhang, and X. Zeng, "Stormwater management of low impact development in urban areas based on SWMM," *Water*, vol. 11, no. 33, pp. 1-16, 2019.
- [8] N.H. Quan, N.D. Hieu, T.T.V. Thu, M. Buchanan, N.D. Canh, M.C.O. Santos, P.D.M.H. Luan, T.T. Hoang, H.L.T. Phung, K.M. Canh, and M. Smith, "Green infrastructure modelling for assessment of urban flood reduction in Ho Chi Minh City," *CIGOS 2019 Innovation for Sustainable Infrastructure, Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 54, pp. 1105-1110, 2020.
- [9] N.B. Chang, J.W. Lu, T.F.M. Chui, and N. Hartshorn, "Global policy analysis of low impact development for stormwater management in urban regions," *Land Use Policy*, vol. 70, pp. 368-383, 2018.
- [10] C.L. Huang, N.S. Hsu, H.J. Liu, and Y.H. Huang, "Optimization of low impact development layout designs for megacity flood mitigation," *Journal of Hydrology*, vol. 564, pp. 542-558, 2018.
- [11] A. Fardel, P.E. Peyneau, B. Béchet, A. Lakel, and F. Rodriguez, "Analysis of swale factors implicated in pollutant removal efficiency using a swale database," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 2, pp. 1287-1302, 2019.
- [12] S.A. Ekka, H. Rujner G. Leonhardt, G. Tobias, M. Blecken Viklander and W.F. Hunt. "Next generation swale design for stormwater runoff treatment: A comprehensive approach," *Journal of Environmental Management*, vol. 279, no. 1, pp. 1-16, 2021.
- [13] D.M. Revitt, J.B. Ellis, and L. Lundy, "Assessing the impact of swales on receiving water quality," *Urban Water Journal*, vol. 14, no. 8, pp. 839-845, 2017.
- [14] N.Y., Tang, T. Li, and J. Ge, "Assessing ability of a wet swale to manage road runoff: A case Study in Hefei, China," *J. Cent. South Univ.*, vol. 23, pp. 1353-1362, 2016.
- [15] R.A. Claytor, and T.R. Schueler, "Design of stormwater filtering systems," Center for Watershed Protection and Chesapeake Research Consortium, Ellicott, USA, 1996.
- [16] R. Pitt, and S.E. Clark, "Integrated storm-water management for watershed sustainability," *Journal of irrigation and drainage engineering*, vol. 134, no. 5, pp. 548-555, 2008.
- [17] BWSC: Boston Water and Sewer Commission, "Stormwater best management practices: Guidance document," Boston, USA, 2013. Available: http://www.bwsc.org/sites/default/files/2019-01/stormwater_bmp_guidance_2013.pdf
- [18] G. Rong, L. Hu, X. Wang, H. Jiang, D. Gan, and S. Li, "Simulation and evaluation of low-impact development practices in university construction: A case study of Anhui University of Science and Technology," *Journal of Cleaner Production*, vol. 294, pp. 1-10, 2021.
- [19] T.J. Hengen, H.L. Sieverding, and J.J. Stone, "Lifecycle assessment analysis of engineered stormwater control methods common to urban

- watersheds,” *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 142 no. 7, 2016.
- [20] A. Göksu, “Bulanık analitik hiyerarşik proses ve üniversite tercih sıralamasında uygulanması,” *Doktora Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2008.
- [21] L.A. Zadeh, “Fuzzy sets, *Information and control*,” vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [22] M.M. Özkan, “Bulanık hedef programlama,” *Ekin Kitabevi*, Bursa, Türkiye, 2003.
- [23] N. Baykal, ve T. Beyan, “Bulanık mantık ilke ve temelleri,” *Bıçaklar Kitabevi*, Ankara, Türkiye, 2004.
- [24] M. Dağdeviren, “Bulanık analitik hiyerarşi prosesi ile personel seçimi ve bir uygulama,” *Gazi Üniv., Müh. Mim. Fak. Dergisi.*, vol. 22, no. 4, pp. 791-799, 2007.
- [25] İ. Ertuğrul, “Bulanık hedef programlama ve bir tekstil firmasında uygulama örneği,” *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, vol. 6 no. 2, pp. 46-79, 2005.
- [26] Z. Şen, “Bulanık mantık ilkeleri ve modelleme,” *Su Vakfı Yayınları*, İstanbul, 2009.
- [27] J.M. Myers, and M.I. Alpert, “Determinant buying attitudes: Meaning and measurement,” *Journal of Marketing.*, vol. 32, no. 4, pp. 13-20, 1968.
- [28] T.L. Saaty, “The analytic hierarchy process,” *McGraw-Hill Inc.*, New York, 1977.
- [29] N. Özgüven, “Vakıf üniversitesi tercihinin analitik hiyerarşi süreci ile belirlenmesi,” *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, no. 30, pp. 279-289, 2011.
- [30] Toksarı, M. “Analitik hiyerarşi prosesi yaklaşımı kullanılarak mobilya sektörü için ege bölgesi’nde hedef pazarın belirlenmesi,” *Yönetim ve Ekonomi*, vol. 14, no. 1, pp. 171-180, 2007.
- [31] E. Yılmaz, “Analitik hiyerarşi süreci kullanılarak çok kriterli karar verme problemlerinin çözümü,” *DOA Dergisi*, vol. 5, pp. 95-122, 1999.
- [32] H. Başlıgil, “The fuzzy analytic hierarchy process for software selection problems,” *Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 3, pp. 24-33, 2005.
- [33] T.L. Saaty, “The analytic hierarchy process,” *McGraw-Hill*, Newyork, pp. 37-85, 1980.
- [34] H. Deng, “Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison,” *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 21, pp. 215-231, 1999.
- [35] P.J.M. Van Laarhoven, and W. Pedrycz, “A fuzzy extension of Saaty’s priority theory”, *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 11, pp. 229-241, 1983.
- [36] J.J. Buckley, “Fuzzy hierarchical analysis,” *Fuzzy Sets and Systems*, 17, 233-247, 1985.
- [37] T.N. Prakash, “Land suitability analysis for agricultural crops: A fuzzy multicriteri decision making approach,” *MSc Thesis*, ITC Institue, Netherlands, 2003.
- [38] F.T.S. Chan, M.H. Chan, and N.K.H. Tang, “Evaluation methodologies for technology selection,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 107 no. 1-3, pp. 330–337, 2000.
- [39] A.D. Basiago, “Economic, social, and environmental sustainability in development theory and urban planning practice,” *The Environmentalist*, vol. 19, pp.145-161, 1999.
- [40] CASQA: California Stormwater Quality Association, “Stormwater best management practice handbook: New development and redevelopment,” California, USA, 2003. Available: https://www.in.gov/indot/files/California_Storm_Water_BMP_Handbook.pdf
- [41] WSCC: West Sussex County Council, “Suds design and adoption guidance, Water people places: A guidance for master planning sustainable drainage into developments,” 2013. Available: https://www.susdrain.org/files/resources/other-guidance/water_people_places_guidance_for_master_planning_sustainable_drainage_into_developments.pdf
- [42] A.M. Hansen, T.E.C. Kraus, S.M. Bachand, W.R Horwath, and P.A.M. Bachand, “Wetlands receiving water treated with coagulants improve water quality by removing dissolved organic carbon and disinfection byproduct precursors,” *Science of Total Environment*, vol. 622-623, pp. 603-613, 2018.
- [43] B.R. Hensel, and M.V. Miller, “Effects of wetlands creation on groundwater flow,” *Journal of Hydrology*, vol. 126, no. 3-4, pp. 293-314, 1991.
- [44] M. Jiang, X.G. Lu, L.S. Xu, L.J. Chu, and S.Tong, “Flood mitigation benefit of wetland soil-A case study in Momoge National Nature Reserve in China,” *Ecological Economics*, vol. 61 no. 2-3, pp. 217-223, 2007.
- [45] EA: Environment Agency, “Rural sustainable drainage systems,” 2012. Available: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/291508/sc_ho0612buwh-e-e.pdf
- [46] C.N. Ceron, A.M. Melesse, R. Price, S.B. Dessu, and H.P. Kandel, “Operational actual wetland evapotranspiration estimation for South Florida using MODIS imagery,” *Remote Sensing*, vol. 7, pp. 3613-3632, 2015.
- [47] MDE and CWP: Maryland Department of the Environment water management administration and Center for Watershed Protection, “Maryland stormwater design manual,” Vol. I & II, Baltimore, USA, 2000. Available: <https://mde.state.md.us/programs/Water/StormwaterManagementProgram/Documents/www.mde.state.md.us>

- [/assets/document/sedimentstormwater/Introduction.pdf](#).
- [48] J. Pokorný, J. Květ, and A. Rejšková, “Wetlands as energy-dissipating systems,” *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, vol. 37, no. 12, pp. 1299-1305, 2010.
- [49] M.F. Bakır, S. Akhuy, ve G. Aydemir, “Permakültür el kitabı ve Marmariç örneği,” 2011. Available: http://permacultureturkey.org/wp-content/uploads/permakultur_el_kitabi.pdf
- [50] NWRM: Natural Water Retention Measures, Individual NWRM: Swales, 2013. Available: http://nwrn.eu/sites/default/files/nwrn_ressources/u4_-_swales.pdf
- [51] CLCA: The City of Lancaster a City, “Authentic, Green infrastructure plan,” 2011. Available: https://uni-groupusa.org/PDF/cityoflancaster_giplan_fullreport_april2011_final_0.pdf
- [52] CNT: Center for Neighborhood Technology, “The value of green Infrastructure: A guide to recognizing its economic environmental and social benefit,” Bioretention and infiltration practices. W. North Avenue, Chicago, 2010. Available: https://www.cnt.org/sites/default/files/publications/CNT_Value-of-Green-Infrastructure.pdf
- [53] Sert, E. “Enerji etkin peyzaj tasarımında yağmur suyu,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [54] Demir, D. “Konveksiyonel yağmur suyu yönetim sistemleri ile sürdürülebilir yağmur suyu yönetim sistemlerinin karşılaştırılması: İTÜ Ayazağa Yerleşkesi Örneği,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [55] C., Liqueste, A., Udias, G., Conte, B.Grizzetti, and F. Masi, “Integrated valuation of a nature-based solution for water pollution control,” *Highlighting hidden benefits, Ecosystem Services*, vol. 22, pp. 392-401, 2016.
- [56] J. Xie, C. Wu, H. Li, and G. Chen, “Study on storm-water management of grassed swales and permeable pavement based on SWMM,” *Water Journal*, vol. 9, no. 840, pp. 1-12, 2017.
- [57] R.J. Winston, W.F. Hunt, S.G. Kennedy, J.D. Wright, and M.S. Lauffer, “Field evaluation of storm-water control measures for highway runoff treatment,” *Journal of Environmental Engineering ASCE*, vol. 138, no. 1, pp. 101-111, 2012.
- [58] L.A. Sanudo-Fontaneda, S.J. Coupe, et. al., “Water sensitive design and renewable energy: Green infrastructure as the future path for flood resilience, food production and energy saving.” *Water Efficiency Conference*, pp. 104-113, 2016.
- [59] N. Prascevic, and Z. Prascevic, “Application of fuzzy AHP for ranking and selection of alternatives in construction project management,” *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 23, no. 8, pp. 1822-3605, 2017.
- [60] H. Tavakol-Davani, S. J. Burian, J. Devkota, and D. Apul, “Performance and cost-based comparison of green and gray infrastructure to control combined sewer overflows,” *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, vol. 2, no. 2, 04015009, 2016.
- [61] D. Kim, and S.K. Song, “The multifunctional benefits of green infrastructure in community development: an analytical review based on 447 cases,” *Sustainability*, vol. 11, no. 14, pp. 1-17, 2019.
- [62] Meerow, S. Natarajan, M. and Krantz, D. “Green infrastructure performance in arid and semi-arid urban environments,” *Urban Water Journal*, vol. 18, no.4, pp. 275-285, 2021.



Farklı Kalınlıktaki Modifiye Asfalt Yol Kaplamalarının Gerilme-Deformasyon ve Ses Yutma Performans Özelliklerinin İncelenmesi

Investigation of Modified Asphalt Pavement with Different Thicknesses On Stress-Strain and Sound Absorption Performance Characteristics

Ahmet Sertaç Karakaş^{1*}, Tarık Serhat Bozkurt²

¹ İstanbul Üniversitesi Rektörlüğü, skarakas@istanbul.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0840-2878>

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, bozkurt@itu.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0001-5642-4986>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 24 Ocak 2022
Revizyon 5 Nisan 2022
Kabul 5 Nisan 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

Bitümlü Sıcak Karışımlar (BSK),
Stiren Butadien Stiren (SBS),
Numerik analiz,
Sonlu elemanlar metodu,
Ses emilimi

ÖZ

Bitümlü sıcak karışım asfalt (BSK) ile hazırlanan asfalt kaplama, yük ve yolcu trafiğinde tercih edilmektedir ve esnek üst yapı tiplerinden biri olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Bu doğrultuda, yol kaplamalarında en çok kullanılan karışım tiplerinden biri olan BSK kaplamanın performans özellikleri çok büyük önem arz etmektedir. Yolun hizmet ömrü boyunca göstermesi beklenen performansı sağlaması gerekmektedir. BSK; yüksek karışım tasarımı, konforlu, güvenli ve bozulmaya karşı dirençli olmalıdır. Ayrıca yol imalatında kullanılan hammaddelerin kısıtlı olması da göz önünde tutulduğunda, asfalt yolların çevresel koşullara (iklim, trafik yoğunluğu, vs.) karşı daha uzun süreli hizmet verebilmesi için asfalt yol karışım içeriğinde katkı malzemelerinin kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Katkı maddeleri arasında Stiren Butadien Stiren (SBS) polimerleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışmada, farklı kalınlıklarda BSK ile hazırlanan SBS modifiyeli asfalt beton kaplamaların değişik kalınlıkları dikkate alınmıştır. Modifiye asfalt kaplamaların gerilme ve deformasyon davranışı sonlu elemanlar metodu uygulanarak numerik analiz yöntemi ile sayısal analizi karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve kalınlık artışının ses yutma katsayısına ile deformasyona olan etkisi araştırılmıştır. Asfalt kaplamalardaki kalınlık artışının, düşük frekanslardaki ses yutma performansını arttırabileceği anlaşılmıştır. Kalınlık artışının deformasyon oranını ciddi düzeyde azaltılabildiği numerik analiz sonucunda tespit edilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 January 2022
Received in revised form 5 April 2022
Accepted 5 April 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Hot Mix Asphalt (HMA),
Styrene Butadiene Styrene (SBS),
Numerical analysis,
Finite element method,
Sound absorption

ABSTRACT

Asphalt pavement prepared hot mix asphalt (HMA) is preferred for both freight and passenger transport. HMA is often used as one of the flexible superstructures. Therefore, the performance properties of HMA coating, which is one of the most used mixture types in road pavements are important key. The road must provide the expected performance throughout its service life. HMA design should be comfortable, safe, and resistant to degradation as well. Besides, it was necessary to use additives in asphalt mixture content to asphalt roads to provide a longer service against environmental conditions (climate, traffic density, etc.) considering the limited amount of raw materials used in road construction. Styrene Butadiene Styrene (SBS) polymers are widely used among additives. In this study, SBS modified asphalt concrete pavements prepared with HMA were considered in different thicknesses. The stress and deformation behavior of modified asphalt pavements were examined comparatively by numerical analysis method and numerical analysis by applying the finite element method (FEM) and it was investigated the effect of thickness not only on increase in sound absorption coefficient but also its effect on deformation.. It is understood that the thickness of asphalt pavements can increase the sound absorption performance at low frequencies. As a result of numerical analysis, it has been determined significantly reduce the deformation rate of pavement with the increase in thickness

Doi: 10.24012/dumf.1062438

* Sorumlu Yazar

Giriş

Bitümlü sıcak karışım asfalt (BSK) kaplamada performans özelliklerini iyileştirmek ve yolun servis ömrünü arttırmak için modifiyer olarak adlandırılan katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Modifiyerler ile birlikte tasarlanan asfalt kaplamaların bozulmalara karşı çok daha dirençli oldukları ve özelliklerini daha uzun süre koruyabildikleri yapılan deneysel çalışmalar ve saha uygulamalarında gözlemlenmektedir. BSK tasarımında çevresel faktörlere karşı asfalt kaplamanın dayanımını ve servis ömrünü arttırmak için polimer esaslı katkılarda kullanılmaktadır. Polimer esaslı katkı malzemeleri arasından genellikle SBS (Styrene-Butadiene-Styrene) blok kopolimer katkı malzemesi yaygın olarak kullanılmaktadır.

BSK kaplamaların mühendislik özelliklerini ve servis ömürlerini iyileştirmek için literatürde SBS katkılı asfalt kaplamaların sıklıkla incelendiği görülmektedir.

SBS modifiyeli asfalt kaplamanın yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna karşı direncinin arttığı, yorulma dayanımının arttığı ve düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna karşı daha durabil olduğu anlaşılmaktadır [1-5]. Cong ve diğerleri, yapmış oldukları araştırmada modifiye edilmiş geri dönüşüm asfalt kaplamayı araştırmışlar, katkı malzemesinin eklenmesi ile birlikte daha iyi nem hassasiyetinin elde edildiği, tekerlek izi direncinin arttığı, düşük sıcaklıktaki çatlakların önlenmesine yönelik performansının arttığı belirtilmiştir [6]. Castillo ve ekibi, SBS/montmorillonit nanokompozit ile modifiye edilmiş asfaltın fiziksel ve reolojik özelliklerinin araştırmışlardır. Araştırmada, modifiye karışım sayesinde yüksek sıcaklıkta ayrışma problemlerinin azaldığı ve asfalt sertliğinin olumlu yönde iyileştiği gözlemlenmiştir [7]. Mulder & Whiteoak [8] yaptıkları araştırmada, polimer katkı maddeleri kullanarak asfaltın modifiye edilebileceğini ve bu şekilde yaşlanma etkilerinin azaltılabileceğini belirtmiştir. Benzer şekilde, Vonk ve arkadaşları [9], polimer katkı malzemelerin asfalt kaplamada kullanılmasını araştırmışlar ve katkı malzemesiyle birlikte asfalt kaplamanın zamana bağlı dayanım süresinin arttırılabileceğini açıklamışlardır. Karakas ve diğerleri [10], SBS modifiyeli sıcak karışım asfalt kaplamanın arazi performansını incelemişlerdir. SBS modifiyeli asfalt kaplamanın performans analizi için tekerlek izi, yorulma direnci, rijitlik modülü ve dolaylı çekme gerilmesi testleri uygulanmıştır. Araştırmada, deney sonuçlarının SBS katkı malzemesi sayesinde daha iyi olduğu belirtilmiştir [10].

Asfalt yol kaplamalarına ait numerik model analizleri bilgisayar ortamında gerçekleştirilmektedir ve bilgisayar ortamında gerçekleştirilen numerik modeller yeni asfalt kaplamaların tasarımına katkı sağlayabilmektedir. Hua ve ekibi [11], ANSYS programını kullanarak 3 boyutlu sonlu elemanlar (SE) ile asfalt tabakasının gerilme ve basınç analizini yapmışlardır. Kalıcı deformasyon ve tekerlek izi performansını test etmişlerdir. Orta tabakanın yanal deformasyonuna ve kesme gerilmesine karşı önemli bir rol oynadığı araştırmada görülmüştür. Vijapure ve

diğerleri [12], asfalt kaplamanın performansını ve asfalt kaplamanın çeşitli trafik durumlarındaki mekanik davranış özelliklerini öngörebilmek amacıyla 3B sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Elastik kaplama katmanında çekme modülünün artışına bağlı olarak gerilmenin arttığı, ancak taban ve alt taban katmanında ise çekme modülünün artışına bağlı olarak gerilmenin azaldığı görülmüştür. Caia ve diğerlerinin çalışmasında, asfalt filmin anizotropik malzeme özelliklerinin mekanik tepkisi ve alt tabaka katmanı / ara katman üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Numerik analizde, kaplama ve taban tabakası arasındaki ince film tabakasının anizotropik yapısının, kaplama tabakasının üst yapısına ait yol davranışına önemli katkılar sunduğu gösterilmiştir. [13]. Sonlu elemanlar yöntemi ile belirtilen gerilme ve basınç düzeyleri doğrultusunda kaplama malzemesinin özellikleri mekanik analizde kullanılmıştır ve bu durum düşük hacimli yollar için tasarım önerileri sunulmasına katkı sağlamaktadır [14].

Bu çalışmada, üstyapı yol kaplaması için 3B sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Sayısal analizde ampirik olarak türetilen parametreler kullanılmıştır. SBS ile modifiye edilmiş asfalt kaplamanın farklı kalınlıktaki yük gerilmesini ve deformasyon davranışını belirleyebilmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır ve bu yöntemle sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Asfalt kaplamalar kent ölçeğinde büyük yüzey alanlarına sahip olabilmektedirler ve kentsel tasarım ölçeğinde büyük yüzey alana sahip oldukları için önemli bir parametre olarak karşımıza çıkabilmektedirler. Özellikle bitişik nizam ve yoğun yerleşimlerde zemin kaplamaları önemli bir alan kaplamaktadır. Yeşil alanlar gözenekli ve emici zemin kaplaması özelliği sergileyebilmekte iken asfalt yollar yansıtıcı özellik gösterebilmektedirler. Yüzey kaplamaların sesin serbest alanda yayılırken ki etkisi ISO 9613-2 [15] standardında açıklanmaktadır. Bu standartta zeminin emicilik özelliği arttığında gürültünün serbest alanda yayılırken azaldığı anlaşılmaktadır. Bu doğrultuda asfalt kaplamaların ses yutma performansının arttırılması çevresel gürültü düzeyini azaltabilmektedir [16].

Çevresel gürültünün kontrol altına alınması gereken önemli bir husustur. Bozkurt ve Demirkale [17] çevresel gürültünün, halk sağlığını ve insan faaliyetlerini önemli ölçüde etkileyebileceğinden bahsetmişlerdir ve işitsel konfor koşullarının sağlanabilmesi için çevresel gürültünün kontrol altına alınması gerektiğini açıklamışlardır. Dünya Sağlık Örgütü çevresel gürültüyü insan sağlığını olumsuz etkileyen ikinci çevresel etki olarak tanımlamıştır. İnsan sağlığını olumsuz etkileyen ilk çevre sorunu hava kirliliği iken, ikinci çevre sorunu gürültü kirliliğidir [18]. Çevresel gürültüler arasında en çok maruz kalınan gürültülerden biri ulaşım kaynaklı gürültülerdir. Ulaşımdan kaynaklanan gürültüler karayolu gürültüsü, demiryolu gürültüsü ve hava yolu gürültüsü olarak sınıflandırılabilir. Karayollarından kaynaklanan gürültüler de günümüzde tüm yerleşim alanlarını oldukça etkilemektedir. Asfalt kaplamanın tüm ulaşım sistemlerinde sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Bu nedenle asfalt kaplamaların akustik özelliklerinin

incelenmesi, ses yutma performansının artırılması ve karayolları nedeniyle aşırı gürültüye maruz kalan insan sayısının azaltılması büyük önem taşımaktadır. Chen ve diğerleri [19], yaşam kalitesini etkileyen ve rahatsızlıklara neden olabilen karayolu trafik gürültüsünün artan araç hacmi ile gözlenen şehir hastalıklarından biri olduğunu belirtmiştir. Kleizené ve diğerleri [20] trafik gürültüsünün her yıl en az 1 milyon Avrupalıda kardiyovasküler hastalığa neden olduğunu tanımlamıştır. Gilani ve Mir'in [21] araştırmasında, aşırı trafik gürültüsünün uyku kalitesini azalttığı anlaşılmaktadır. Barros ve diğerleri [22] trafik gürültüsüne uzun süre maruz kalmanın kardiyovasküler hastalıklara, bilişsel işlev bozukluklarına ve uyku bozukluğu gibi sağlık sorunlarına neden olabileceğini açıklamışlardır.

Yapı elemanı ölçeğinde düşük frekansların ses yalıtımı, yüksek frekanslardan daha maliyetli ve daha zor olabilmektedir. Ginn [32], Metha ve diğerleri [33], Barron [34], Beranek & Ver [35], Everest & Pohlmann [27] ve Jaramillo & Stell [36] tarafından yapılan çalışmalarda, yapı elemanı ölçeğinde ses yalıtım ilkeleri açıklığa kavuşturulmuştur. Söz konusu kaynaklarda, alçak frekansların ses yalıtım düzeyinin artırılması için yapı elemanının kesit yoğunluğunun artırılması veya yapı elemanının kesit kalınlığının artırılmasının gerekebileceği gösterilmiştir. Özet olarak, kentsel ölçekte çevresel gürültü kontrol altında tutulmazsa bina cephelerinde kalın kesitler ve ağır pencere sistemleri kullanmak gerekebilmektedir. Bu kapsamda, yapı elemanları ölçeğinde ses yalıtım sorunlarına çözüm bulmak, kentsel ölçekten çok daha pahalı olabilmektedir. Bu nedenle kentsel ölçekte düşük frekanslı gürültünün önlenmesi önemli bir tasarım kararıdır. Trafik gürültüsünün spektrum özellikleri ISO 717-1 standardında [37] belirtilmiştir. Trafik gürültüsünün düşük frekanslarda etkili olduğu ISO 717-1 standardında anlaşılmaktadır. Mikhailenko ve ark. [38], asfalt kaplama

araştırmalarında 1200 Hz'e kadar ses yutma katsayısını göstermişler ve trafik gürültüsünün düşük frekanslarda etkili olduğunu tanımlamışlardır.

Asfalt kaplamada düşük frekanslı ses yutma performansının artırılması trafik gürültüsünü azaltmak için önemli parametrelerden biridir. Bu kapsamda, asfalt kaplamaların ses yutma performanslarının artırılması önem arz etmektedir ve araştırılması gereken önemli konulardan biri olmaktadır.

Literatürde, asfalt kaplamalarda düşük frekansların ses yutma performansı sıklıkla araştırılmakta ve etkileyen parametreler detaylandırılmaktadır. Önemli parametrelerden biri asfalt kaplama kalınlık artışının ses yutma performansına etkisidir. Araştırmalarda, asfalt kaplama kalınlığının artırılması, düşük frekanslardaki ses yutma katsayısını arttırabilmektedir. Chu ve ekibinin [39], Shen ve diğerlerinin [40], Wang ve arkadaşlarının [41], Peng ve diğerlerinin [42] çalışmalarında, asfalt tabakasının kalınlığı arttığında düşük frekanslardaki ses yutma katsayılarının artabileceği gözlemlenmektedir. Bu kapsamda, asfalt kaplama kalınlık artışı trafik gürültüsünün azaltılabilmesinde önemli bir tasarım kararlarından biri olabilmektedir. Belirlenen nedenlerle ulaşım gürültüsünün azaltılması ve kontrol altında tutulması kent sağlığı açısından zorunludur. Asfalt yüzey kaplamalarının ses yutma performansının yüksek olması göz önünde tutulması gereken önemli bir tasarım parametresi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu araştırmada, değişen asfalt kalınlıklarının ve değişen asfalt karışım içeriklerinin ses yutma performansına olabilecek etkisi incelenmek istenmiştir.

Asfalt kaplamalarda, belirli frekans aralığındaki ses yutma katsayısının arttırılabildiği literatür örnekleri ve ses yutma katsayısı artırma yöntemleri Tablo 1'de açıklanmıştır.

Tablo 1. Asfalt kaplamalarda, belirli frekans aralığındaki ses yutma katsayısının arttırılabildiği literatür örnekleri ve ses yutma performansı artırma yöntemleri (X: kullanılan yöntem tipi)

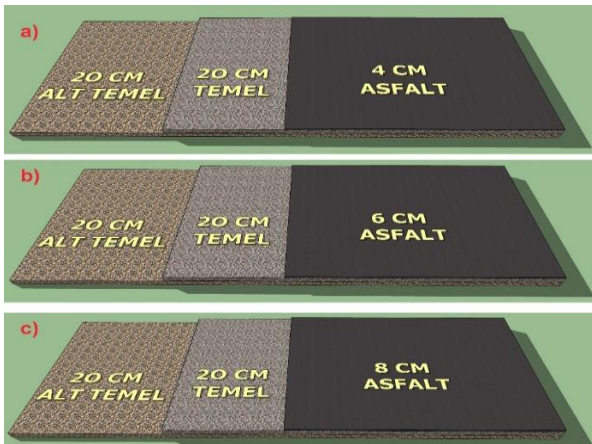
Literatür örnekleri	Asfalt kaplamadaki üst katman kalınlığının artırılması	Asfalt karışımı içerisindeki agrega dane boyutlarının değiştirilmesi	Asfalt Karışım içeriğinde kullanılan agrega tipinin değiştirilmesi	Asfalt karışımı içerisinde kırıntı kauçuk katkısının kullanılması	Asfalt kaplamalarda gözenekli asfalt sistemlerinin kullanılması	Asfalt karışımlarında lif katkısının kullanılması
Chu ve diğerleri [39]	X					
Shen ve diğerleri [40]	X		X			
Wang ve diğerleri [41]	X					
Peng ve diğerleri [42]	X					
Gardziejczyk ve diğerleri [43]		X				
Kolodziej ve diğerleri [44]		X				
Morcillo ve diğerleri [45]				X		
Mavridou & Kehagia [46]				X		
Vázquez ve diğerleri [47]				X		
Wang ve diğerleri [48]						X
Kalauni & Pawar [49]					X	
Li ve diğerleri [50]					X	
Vaitkus ve diğerleri [51,52]					X	

Bu çalışmada literatür araştırmalarını dikkate alınmıştır. Numerik model olarak kalınlık artışının deformasyon ve gerilme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca literatür araştırmaları doğrultusunda kalınlık artışının ses yutma performansını arttırabileceği literatür araştırmaları doğrultusunda öngörülmektedir.

Malzemeler ve Yöntemler

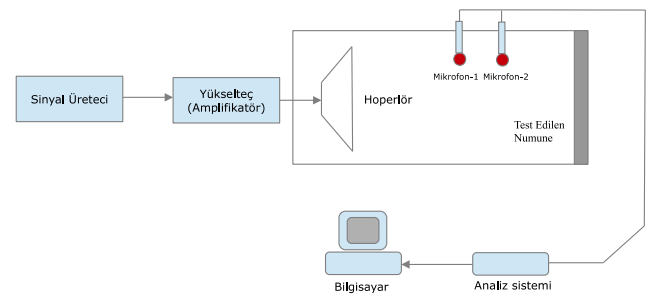
Çalışma kapsamında Türkiye Petrol Rafinerilerinde (TÜPRAŞ) temin edilen B50/70 sınıfında saf bitüm bağlayıcı ve KRATON D 1101 içeren SBS (Stiren-Bütadien-Stiren) blok kopolimeri, modifiyer olarak kullanılmıştır. BSK'da, %5,24 optimum SBS modifiyeli bitüm oranı dizayn çalışmasında uygulanmıştır. BSK'da kullanılacak agregalar, Cebeci bölgesindeki kireç taşı kaynağından kırma taş agrega olarak elde edilmiştir. BSK'lar İstanbul Habibler bölgesinde yer alan plent şantiyesinde hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında yol üst yapısının dizayn çalışmasında tüm tabakalar (kaplama, temel ve alt temel) Karayolları Teknik Şartnamesi (KTS), [23] esasları dikkate alınarak belli kalınlıklarda modelde kullanılmak üzere dizayn özellikleri belirlenmiştir.

Numerik analizde alt katman olarak granüller taban katmanı uygulanmıştır. Yol üst yapılarında kullanılan alt temel ve temel kalınlıkları 20 cm olarak kurgulanmıştır. Numerik analiz çalışmasında kaplama tabakası kalınlıkları sırasıyla 4 cm, 6 cm ve 8 cm olmak üzere üç farklı kalınlıkta olacak şekilde belirlenmiş ve analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. KTS limit gereklilikler doğrultusunda malzemeler seçilmiştir. Bu çalışma, SBS katkısı ile üretilen asfalt kaplamaların davranışını farklı kalınlıklarda tahmin edebilen bir 3B sonlu eleman modellemesinin geliştirilmesini sunmaktadır. Hazırlanan modeller kullanılarak çeşitli parametrelerin verimliliği değerlendirilebilecektir. ANSYS yazılımı kullanılarak yolun üst yapısı için üç farklı model hazırlanmıştır. Karakas ve diğerleri [10] tarafından hazırlanan çalışmadan laboratuvar testlerinin sonuçları elde edilmiş ve sayısal modelin doğruluğu teyit edilmiştir. Benzer şekilde Karakas ve diğerlerinin [24] yaptığı model çalışmaları da dikkate alınmıştır. SBS modifiyeli asfalt betonunu çeşitlerinin farklı kalınlıkları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. SBS katkılı asfalt kaplama tasarımının farklı kalınlıkları, a) 4 cm asfalt kaplama, b) 6 cm asfalt kaplama, c) 8 cm asfalt kaplama

Ses yutma katsayısının ölçülmesinde 2 farklı standardın kullanılabilirdiği literatürde gözlemlenmektedir. ISO 354 standardı [25] doğrultusunda frekanslara göre ses yutma katsayısı ölçümleri çınlama odasında gerçekleştirilmektedir ve bu ölçüm yönteminde yaygın yansıma durumundaki ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları elde edilir. Literatürde yaygın kullanılan farklı bir ses yutma katsayısı ölçüm yöntemi de ISO 10534-2 standardında açıklanmıştır. ISO 10534-2 standardında [26] empedans tüpü yöntemi kullanılır ve yüzeye dik olarak gelen ses dalgalarının ses yutma katsayısı ölçümü gerçekleştirilir. Gerçek yaşam koşullarında ses dalgası bir yüzeye sadece dikey doğrultuda ulaşmaz ve farklı açılar ile yüzeye gelen ses dalgaları da mevcuttur. Bu sebeple çınlama odasında ISO 354 standardı doğrultusunda ölçümü yapılan ses yutma katsayısı sonuçları ile ISO 10534-2 standardı doğrultusunda empedans tüpünde yapılan ölçüm sonuçları birbirinden farklı olmaktadır. Çınlama odasında elde edilen yaygın yansıma durumundaki ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları, empedans tüpünden elde edilen dikey yansıma durumundaki ses yutma katsayısı ölçüm sonuçlarına göre daha yüksektir [27]. Empedans tüpünde ses yutma katsayısı ölçümü çok hızlı ve pratik bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Çınlama odasında ölçüm yapabilmek için yüksek miktarda malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebepten dolayı, empedans tüpü yönteminde ses yutma katsayısı ölçümlerinin yapılması çok daha ekonomik olabilmektedir. Literatürde, çok sayıda farklı malzemelerin karşılaştırılması yapıldığında, empedans tüpü ses yutma katsayısı ölçüm yönteminin kullanıldığı sıklıkla görülmektedir. ISO 10534-2 standardında belirtilen empedans tüpü ses yutma katsayısı ölçüm yöntemi şematik olarak Şekil 2'de sunulmaktadır. Empedans tüpü içerisine numune yerleştirilir ve şekildeki farklı mikrofonların ölçüm verileri analiz edilerek test edilen numunenin ses yutma katsayısı elde edilir.



Şekil 2. ISO 10534-2 standardında belirtilen empedans tüpü ses yutma katsayısı ölçüm sisteminin şematik anlatımı [26]

Sonlu Elemanlar Analizi

Yol üst yapısında sonlu elemanlar modellerinde kullanılan tüm malzemelerin lineer elastik-izotropik davranışa sahip olduğu varsayılmıştır. Yol üst yapısındaki aşınma, temel

ve alt temel tabakalarının mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. İncelenen yol üst yapısının malzeme özellikleri

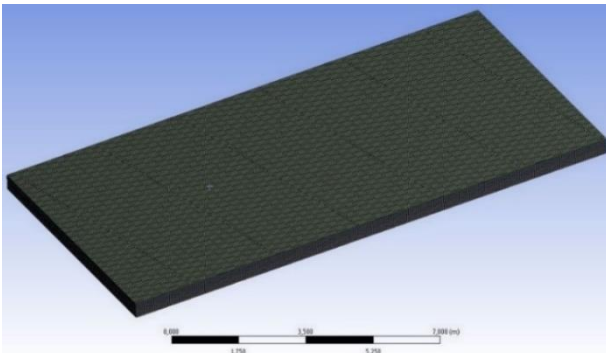
Katmanlar	Kalınlık (m)	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı	Yoğunluk (t/m ³)	Stabilite (kN)	Akma (mm)
Aşınma tabakası	0,10	3414	0,35	2,280	18,02	2,47
Granül temel tabakası	0,20	150	0,30	2,30	-	-
Alt temel tabakası	0,20	100	0,30	2,25	-	-

Modele kuadratik tetrahedral eleman tipi atanmıştır. Her 3 modelin de kalınlıkları farklı olması sebebiyle, modeller farklı elemanlara veya düğümlere sahip olacak şekilde tanımlanmıştır ve bunun sayesinde modelin yüksek doğruluğa sahip olması amaçlanmıştır. Farklı üst yüzey kalınlıklarına sahip asfalt kaplamaların sonlu eleman modelleri hazırlanmıştır. Tüm modeller, 50 mm mesh boyutunda katı elemanlarla elemanlara ayrılmıştır. Modellerin mesh özellikleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 3. Üst yol yapısının mesh özellikleri

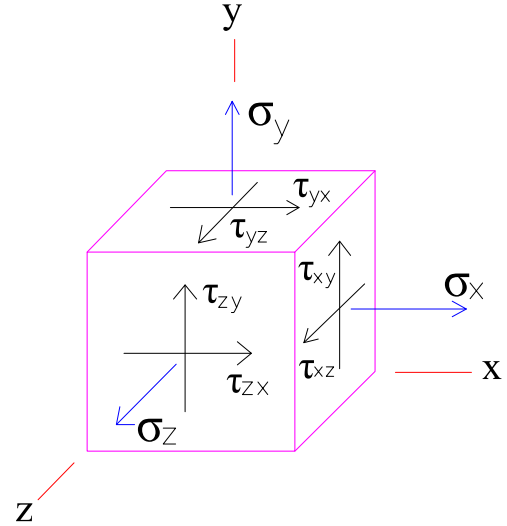
Model özellikleri	Eleman Sayısı	Düğüm sayısı
4 cm kalınlığındaki asfalt kaplaması	352800	1777881
6 cm kalınlığındaki asfalt kaplaması	392000	1935943
8 cm kalınlığındaki asfalt kaplaması	392000	1935943

Sonlu eleman analiz modelleri için gerekli sınır koşulları gerçek çalışma koşullarına göre tanımlanmıştır. Kaplamanın üst yüzeyine uygulanan kuvvet 18,02 kN olup, modellerin alt yüzeyleri sabit mesnet olarak atanmış, böylece herhangi bir yer değiştirme ve dönmeye izin verilmemiştir. Temas eden yüzeyler birbirine bağlı olduğu kabul edilmiştir ve ayrılma ve sürtünme ihmal edilerek analiz gerçekleştirilmiştir. 4 cm kalınlığında asfalt tabakasının mesh yapısının örnek modeli Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. 4 cm kalınlığında asfalt kaplama mesh yapısı [28]

Modellere ait gerilme-deformasyon ilişkilerinin belirlenmesinde kullanılan numerik analizde Von-Mises gerilmeleri elde edilmiştir. Von Mises gerilimi, belirli bir malzemenin akacağını veya kırılacağını belirlemek için kullanılan bir değerdir. Von Mises akma kriterine göre; bir malzemenin yük altındaki Von Mises gerilimi, aynı malzemenin basit gerilim altında akma sınırına eşit veya ondan büyükse, o zaman malzemenin akacağını belirtir. Şekil 4'te dizayn malzemesi üzerinde altı gerilim bileşeni tarafından ifade edilen Von Mises gerilim denklemi çıkarılmıştır [29].



Şekil 4. Von Mises gerilme eşitliğinin altı gerilme bileşeniyle belirlenmesi [29]

Şekil 4'te verilen Von Mises gerilme eşitliğinin alt gerilme bileşeniyle belirlenmesi ile ilgili formül Eşitlik-1'de sunulmaktadır.

Von Mises geriliminin koordinat ekseninde yüzey alanı üzerindeki gerilmelerinin gösterimleri ve farklı gerilme durumlarındaki Von Mises denklemleri Tablo 4'te verilmiştir.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (1)$$

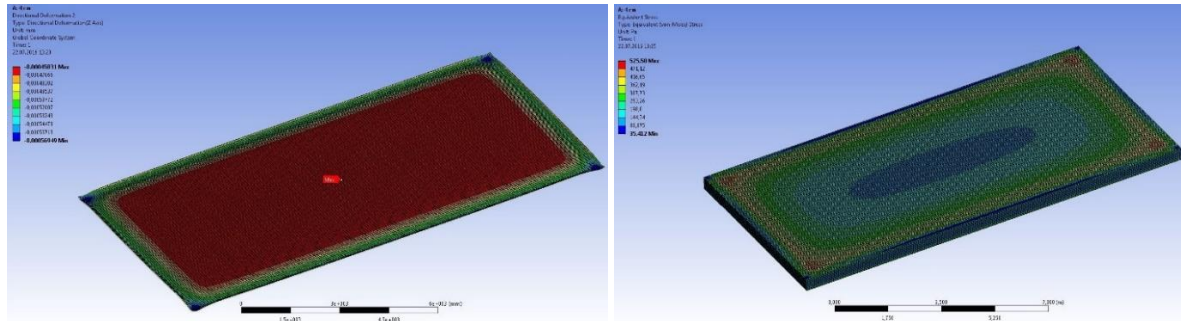
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ = kayma gerilmeler

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = eksenel gerilmeler

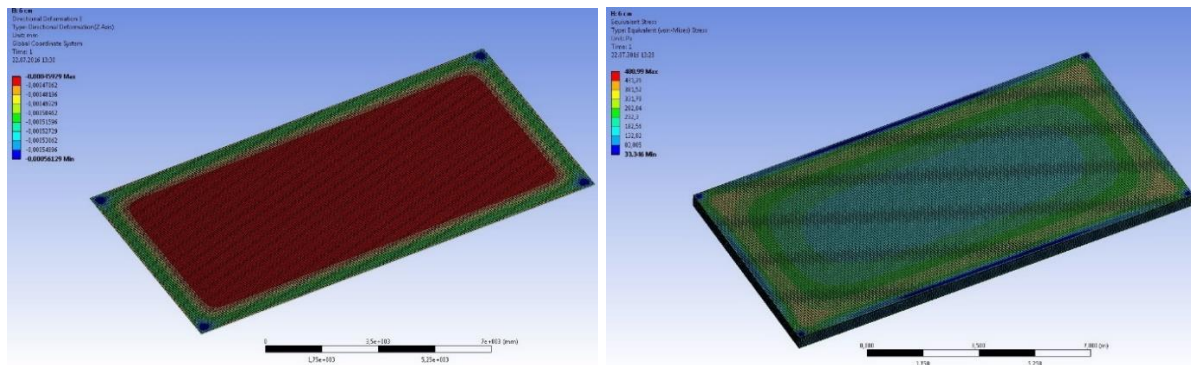
Tablo 4. Farklı Gerilme Durumlarındaki Von Mises Denklemi Uygulamaları [30]

Yükleme Senaryoları	Sınırlamalar	Sadeleştirilmiş Von Mises Denklemleri
Genel	Sınırlama yok	$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)]}$
Asal Gerilmeler	Sınırlama yok	$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$
Genel düzlem gerilmeleri	$\sigma_3 = 0$ $\sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{11}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}^2 + 3\sigma_{12}^2}$
Başlıca düzlem gerilmeleri	$\sigma_3 = 0$ $\sigma_{12} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}$
Saf kesme gerilmeleri	$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ $\sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sqrt{3} \sigma_{12} $
Tek eksenli	$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ $\sigma_{12} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$	$\sigma_v = \sigma_1$

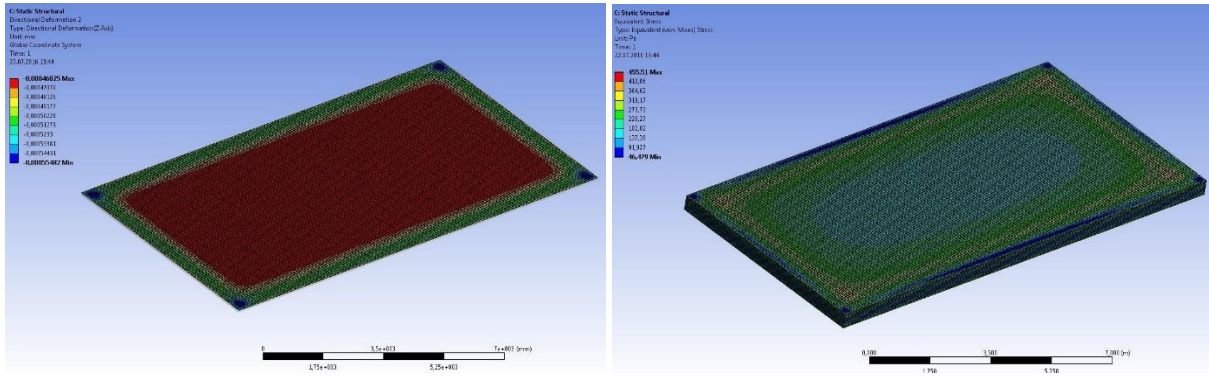
Farklı kalınlıklardaki asfalt kaplamaların eşdeğeri gerilme-deformasyon yapısı (Von-Mises) sırasıyla Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 5. 4 cm kalınlığındaki asfalt kaplamasının eşdeğer gerilme-deformasyon yapısı (Von-Mises)



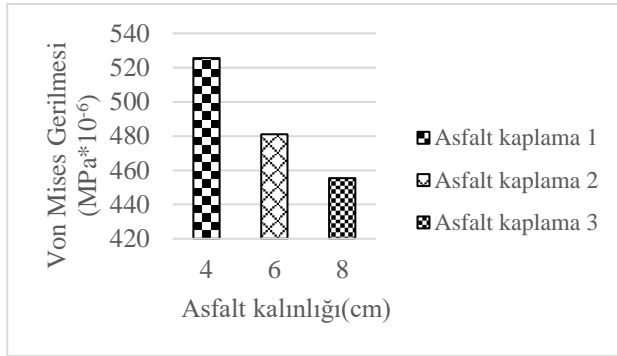
Şekil 6. 6 cm kalınlığındaki asfalt kaplamasının eşdeğer gerilme-deformasyon yapısı (Von-Mises)



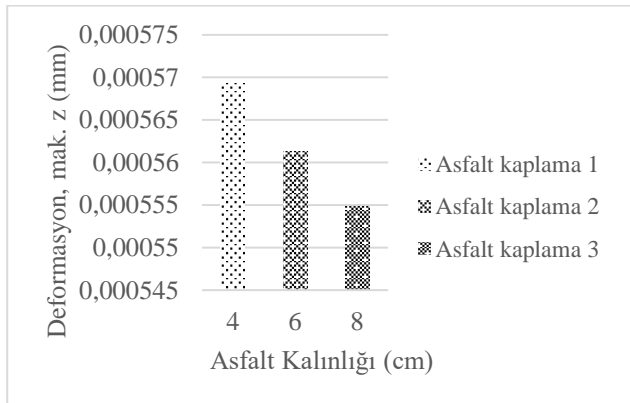
Şekil 7. 8 cm kalınlığındaki asfalt kaplamanın eşdeğer gerilme-deformasyon yapısı (Von-Mises)

Bulgular ve Tartışma

Ampirik deneysel parametreler [31] ile analizler yapılmış ve uygun analiz yöntemi ile numerik analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı kalınlıktaki asfalt kaplamaların Von Mises gerilmesi ve deformasyonu sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 8. Farklı asfalt kaplama kalınlıkları için Von Mises gerilmesi



Şekil 9. Farklı asfalt kaplama kalınlıklarının deformasyonu

Ampirik çalışmalardan elde edilen parametrelerle sonlu elemanlar yöntemi uygulanmış ve asfalt kaplamanın farklı katmanlarının Von Mises gerilme-deformasyon

yapısı analiz edilmiştir. Üstyapı asfalt kaplama kalınlık değişimlerinin gösterildiği Şekil 5-7'de asfalt kaplama kalınlığı arttıkça Von Mises gerilmesinin azaldığı anlaşılmaktadır. 4 cm kalınlığındaki SBS katkılı asfalt kaplamanın Von Mises gerilmesi 525.58 Pa ile maksimum düzeye sahip olduğu belirlenmiş ve 8cm kalınlığındaki SBS katkılı asfalt kaplamanın Von Mises gerilmesi 455.51 Pa ile minimum düzeye sahip olduğu tespit edilmiştir. Asfalt kaplama tabaka kalınlığının iki katına çıktığı takdirde Von Mises gerilmesinin, %15,4 civarında azaldığı numerik analiz sonucunda gözlemlenmiştir. Deformasyon düzeyi ile asfalt kalınlığı arasındaki ilişki analiz edilmiş, asfalt üst kaplama kalınlığı 4cm olduğunda deformasyon miktarının 56949×10^{-8} mm olduğu gözlemlenmiş, asfalt üst kaplama kalınlığı 8cm olduğunda ise deformasyon miktarının 55482×10^{-8} mm olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere asfalt kaplama kalınlığındaki artış yol üstyapısında Von Mises gerilmelerinde ve deformasyonlarda azalmalara yol açmıştır. Yol üstyapısında en fazla trafik yüklerine maruz kalan asfalt kaplama kalınlığı miktarındaki artış, kaplamanın uygun dizayn ve sıkıştırma koşullarında aşınmalara, tekerlek izi ve yorulmalara karşı daha durabil, trafik ve iklim gibi çevresel koşullara karşı asfalt kaplamanın gerilme dayanımı yüksek olarak deformasyonu dikkate değer düzeyde azaltacaktır. Asfalt üst kaplama kalınlığı ile Von Mises gerilme ve deformasyon miktarı arasındaki korelasyon ilişkisi numerik model analizi ile incelenmiştir. Asfalt üst kaplama kalınlığına bağlı olarak Von Mises gerilme-deformasyon fonksiyon denklemleri çıkarılmış fonksiyon tipleri polinom olarak kabul edilmiş, korelasyon katsayılarında güçlü bir ilişki görülmüştür. Asfalt üst kaplama kalınlığına bağlı olarak elde edilen regresyon modellerindeki matematiksel fonksiyon denklemleri ve korelasyon katsayıları Tablo 5'te gösterilmektedir.

Tablo 5. Regresyon modellerindeki stres ve deformasyona göre fonksiyon tipi ve matematiksel denklem tipi

Regresyon modelleri	Model Tipi	Fonksiyon Tipleri	Fonksiyon Denklemi	R ²
Değişen asfalt kalınlıklarına göre	Von Mises	Polinom	$y = 9,555x^2 - 73,255x + 589,28$	1
Değişen asfalt kalınlıklarına göre	Deformasyon, z	Polinom	$y = 8E-07x^2 - 1E-05x + 0,0006$	1

Asfalt kaplamalarda, belirli frekans aralıklarındaki ses yutma performansını artırılması için kullanılan yöntemler literatürde araştırılmıştır. Asfalt kaplamadaki kalınlık artışından farklı olarak asfalt karışımı içeriğinde gerçekleştirilen birtakım değişikliklerin de ses yutma katsayısını arttırabildiği gözlemlenmektedir. Asfalt karışım içeriğinde kullanılan agrega dane boyutunun değiştirilmesi veya asfalt karışım içeriğinde kullanılan agrega tipinin değiştirilmesi belirli frekans aralığındaki ses yutma performansını arttırabilmektedir. Asfalt karışım içeriğine kırıntı kauçuk malzemesinin eklenmesi ses yutma katsayısını belirli frekans aralığında iyileştirebildiği görülmektedir. Asfalt kaplamalarda lif katkısının kullanılması ses yutma katsayısını belirli frekans aralıklarında arttırabildiği literatürde verilmiştir. Literatürde, ses yutma katsayısının belirli frekans aralığında arttırılması için gözenekli asfalt kaplama sistemlerinin kullanılabilirliği gözlemlenebilmektedir. Asfalt karışım içeriğinde yapılacak değişiklikler ile ses yutma katsayısının arttırılması çok geniş bir araştırma konusudur.

Sonuç

Asfalt kaplamalarda istenilen performansı gösterebilmek için iklim ve tasarım çalışmaları gibi trafik ve çevre koşulları dikkate alınarak tasarlanan koşulların göz önünde tutulması gerekmektedir. Aksi takdirde birçok kaplamada bozulmaların gözlemleneceği öngörülmektedir. Hammadde miktarının sınırlı olması, üst asfalt kaplamanın araçlara bağlı olarak yüke maruz kalması nedeniyle, SBS gibi polimer katkı maddelerinin kullanılmasının tasarlanması ve gerilme mukavemetin arttırılması için katman kalınlığının belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca arazide yol uygulanması sırasında arazinin topoğrafyası dikkate alınarak ve yolun eğimi yanında yolun tasarımında sıkıştırma derecesine dikkat edilerek yolun standart geometrik koşulları sağlanmalıdır.

Çevresel gürültünün kontrol altında tutulması gerekmektedir ve asfalt kaplamaların ses yutma performansı çevresel gürültü kontrolünde etkili bir parametredir. Bu kapsamda, asfalt kaplamanın ses yutma katsayısının arttırılması çevresel gürültü düzeyini azaltabilmektedir. Bu çalışmada üç farklı kalınlıkta katman kalınlığının (4 cm, 6 cm ve 8 cm) deformasyon ve gerilme üzerine etkisi numerik model olarak incelenmiştir. Literatür çalışmalarında asfalt kaplamada kalınlık artışının düşük frekanslardaki ses yutma katsayısını arttırabildiği gözlemlenebilmektedir. Bu doğrultuda, asfalt kaplamadaki üst katman kalınlığının

arttırılmasının düşük frekanslardaki ses yutma katsayısının arttırılabileceği ön görülmektedir. Ses yutma katsayısının arttırılabilmesi için asfalt karışım içeriğinde yapılabilecek değişiklikler ve literatürde kullanılan yöntemler hakkında bilgiler açıklığa kavuşturulmuştur.

Bu çalışmada, farklı asfalt kalınlıklarına sahip üç modelden elde edilen sayısal sonuçlar, önerilen modellemenin doğruluğunu göstermektedir ve önerilen modeller referans deneysel çalışma ile iyi bir uyum içinde olduğu anlaşılmaktadır.

Referanslar

- [1] Lu, X. and Isacson, U., Laboratory study on the low temperature physical hardening of conventional and polymer modified bitumens, *Construction and Building Materials*, 14, 79-88 (2000), [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00012-X](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00012-X)
- [2] Navarro, F.J., Patal, P., Martinez-Boza, F., Valencia, C. and Gallegos, C., Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumens, *Chemical Engineering Journal*, 89, 53-61 (2002), [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00023-2)
- [3] Airey, G.D., Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens, *Fuel*, 82, 14, 1709- 1719 (2002), [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00146-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00146-7)
- [4] Aglan, H., Othman, A., Figueroa, L. and Rollings, R., Effect of styrene-butadiene- styrene block copolymer on fatigue crack propagation behavior of asphalt concrete mixtures, *Transportation Research Record*, 1417, 178-186. (1993).
- [5] Khattak, M.J. and Baladi, G.Y., Engineering properties of polymer – modified asphalt mixtures, *Transportation Research Record*, 1638, 12-22. (1998), <https://doi.org/10.3141/1638-02>
- [6] Peiliang Cong, Yihan Zhanga, Ning Liua, Investigation of the Properties of asphalt mixtures incorporating reclaimed SBS modified asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, 113, 334–340 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.059>
- [7] Samuel Zapién-Castillo, José Luis Rivera-Armenta, María Yolanda Chávez-Cinco, Beatriz Adriana Salazar-Cruz, Ana María Mendoza-Martínez, Physical and rheological properties of asphalt modified with SEBS/montmorillonite nanocomposite, *Construction and Building Materials*, 106, 349–356 (2016), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.099>

- [8] Mulder, E.A. and Whiteoak, C.D., An Objective Assessment of the In-Service Performance Of Thermoplastic Rubber Modified Bitumens for Road Applications, Proceedings, 16th Arrb Conference, Perth, Western Australia, 16, 2, 309-334 (1992).
- [9] Vonk, W.C., Phillips, M.C. and Roele, M., Ageing Resistance of Bituminous Road Binders: Benefits of SBS Modification, Proceedings of 5th Eorobitume Congress, Stockholm, IA, 156-160 (1993).
- [10] Karakas, A.S., Kuloglu, N., Kok, B.V., Yilmaz, M., The evaluation of the field performance of the neat and SBS modified hot mixture asphalt, Construction and Building Materials, 98, 678-684, (2015), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.140>
- [11] Xiaodi Hua, Shen Zhonga and Lubinda F. Walubitab, Three-dimensional modelling of multilayered asphalt concrete pavement structures: strain responses and permanent deformation, Road Materials and Pavement Design, 16, 3, (2015), <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1028968>
- [12] Prasad Vijapure, Prateek Shurpali, Pawan Agarwal, Srinivas Allapur, Finite Element Analysis of Flexible Pavement, International Journal of Computer & Mathematical Sciences, 4, 5, (2015).
- [13] Yingchun Caia, Ali Sangghalehb, Ernian Panb, Effect of anisotropic base/interlayer on the mechanistic responses of layered pavements, Computers and Geotechnics, 65, 250–257, (2015), <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.12.014>
- [14] Ankit Gupta, Praveen Kumar & Rajat Rastogi, Mechanistic–empirical approach for design of low volume pavements, International Journal of Pavement Engineering, 16, 9, (2015), <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.960999>
- [15] ISO 9613–2:1996, Acoustics, Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2: General method of calculation
- [16] Bozkurt, T.S., Preparation of Industrial Noise Mapping and Improvement of Environmental Quality, Current Pollution Reports (2021), Volume 7, Pages: 325 - 343, <https://doi.org/10.1007/s40726-021-00195-3>
- [17] Bozkurt, T.S., Demirkale, S.Y., The field study and numerical simulation of industrial noise mapping, Journal of Building Engineering, Volume 9, January 2017, Pages 60-75, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.11.007>
- [18] World Health Organization, (2018), Environmental Noise Guidelines for the European Region, ISBN 978 92 890 5356 3
- [19] Chen, D., Ling C., Wang T., Su, Q., Ye, A., Prediction of tire-pavement noise of porous asphalt mixture based on mixture surface texture level and distributions, Construction and Building Materials 173 (2018) 801–810, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.062>
- [20] Kleizienė R., Šernas O., Vaitkus A., Simanavičienė R., Asphalt Pavement Acoustic Performance Model. Sustainability. 2019; 11(10):2938. <https://doi.org/10.3390/su11102938>
- [21] Gilani, T.A., Mir, M.S. A study on the assessment of traffic noise induced annoyance and awareness levels about the potential health effects among residents living around a noise-sensitive area. Environ Sci Pollut Res 28, 63045–63064 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15208-3>
- [22] Grangeiro de Barros, A., Kampen, J.K., Vuye, C., The Impact of Thin Asphalt Layers as a Road Traffic Noise Intervention in an Urban Environment, Sustainability 2021, 13, 12561. <https://doi.org/10.3390/su132212561>
- [23] Karayolları Teknik Şartnamesi, Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2013
- [24] Karakas A.S., Bozkurt T.S., Sayin B., and Ortes F., An assessment of SBS modified asphalt concrete pavements performance features performing numerical analysis, AIP Conference Proceedings 1863, 540002 (2017) <https://doi.org/10.1063/1.4992679>
- [25] ISO 354:2003, Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room
- [26] ISO 10534-2, Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method
- [27] Everest, F., A. Pohlmann, K., C., (2009), Master Handbook of Acoustics, McGraw-Hill, Beşinci Baskı, ISBN: 978-0-07-160333-1
- [28] ANSYS Workbench, version 14.5. ANSYS Inc., Canonsburg, PA, (2012).
- [29] Reena R. Patel, Guillermo Riveros, Edward Perkins, A Transdisciplinary Approach for Analyzing Stress Flow Patterns in Biostructures, Mathematical and Computational Applications 24(2):47, April 2019, DOI:10.3390/mca24020047
- [30] Gere, J.M., and Timoshenko, S.P. Mechanics of Materials, Second Edition, Wadsworth, Inc., Belmont, California, 1984; p.351-355, 414-415.
- [31] Karakaş, A.S., Sayin, B., Kuloglu, N. The changes in the mechanical properties of neat and SBS-modified HMA pavements due to traffic loads and environmental effects over a one-year period. Construction and Building Materials, 71, 406–415 (2014), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.060>
- [32] Ginn K. B., (1978), ARCHITECTURAL ACOUSTICS, Brüel & Kjaer, ikinci Baskı, ISBN: 87 87355 24 8
- [33] Mehta, M., Johnson, J. and Rocaford J., (1999), Architectural Acoustics Principles and Design, Prentice Hall, ISBN: 0-13-793795-4
- [34] Barron, R. F., (2003), Industrial Noise Control and Acoustics, Marcel Dekker Inc., Newyork, Basel. ISBN:0-8247-0701-X
- [35] Beranek, L. L., Ver, I. L., (2006), Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications, John Wiley&Sons, Inc., ISBN-13: 978-0471-44942-3 ve ISBN-10: 0471-44942-3
- [36] Jaramillo, A. M., Stell, C., (2015), Architectural Acoustics, Taylor & Francis Group, ISBN: 978-1-315-75284-6 (ebk)
- [37] ISO 717-1:2013, Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation

- [38] Mikhailenko, P., Piao, Z., Kakar, M.R., Athari, S., Bueno, M., Poulikakos, L.D., Effect of waste PET and CR as sand replacement on the durability and acoustical properties of semi dense asphalt (SDA) mixtures, *Sustainable Materials and Technologies* 29 (2021) e00295, <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00295>
- [39] Chu L., Fwa, T. F., Tan, K.H., Evaluation of wearing course mix designs on sound absorption improvement of porous asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, Volume 141, 15 June 2017, Pages 402-409, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.027>
- [40] Shen, D.-H., Wu, D.-H., Du, J.-C.: Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture. *Constr. Build. Mater.* 23(1), 453–461 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.001>
- [41] Wang, Z., Xie, J., Gao, L., Liu, M., Liu, Y., Improvement of acoustic model and structural optimization design of porous asphalt concrete based on meso-structure research, Volume 265, 30 December 2020, 120327, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120327>
- [42] Peng, B., Han, S., Han X., (2021): Laboratory and field evaluation of noise characteristics of porous asphalt pavement, *International Journal of Pavement Engineering*, <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1893319>
- [43] Gardziejczyk, W., Jaskula, P., Ejsmont, J.A., Motylewicz, M., Stienss, M., Mioduszewski, P., Gierasimiuk, P., Zawadzki, M., Investigation of Acoustic Properties of Poroelastic Asphalt Mixtures in Laboratory and Field Conditions, *Materials* 2021, 14, 2649, <https://doi.org/10.3390/ma14102649>
- [44] Kolodziej, V.M., Triches, J.S. Ledezma, G.C., Carlesso, L.M., Jardin, L.M., Knabben, R.M., Functional and durability properties evaluation of open graded asphalt mixes, *Transport Infrastructure and Systems*, 2017, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-03009-1
- [45] Morcillo, M.A., Hidalgo, M.E., Pastrana, M.d.C., García, D., Torres, J., Arroyo, M.B., LIFE SOUNDLESS: New Generation of Eco-Friendly Asphalt with Recycled Materials. *Environments* 2019, 6, 48. <https://doi.org/10.3390/environments6040048>
- [46] Mavridou, S., Kehagia, F., Environmental Noise Performance of Rubberized Asphalt Mixtures: Lamia’s case study, *Procedia Environmental Sciences* 38 (2017) 804 – 811, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.165>
- [47] Vázquez, V.F., Terán, F., Huertas, P., Paje, S.E., Asphalt Pavement with High Content of Crumb Rubber. Acoustic Assessment, *WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities*, 4th International Conference, September 2017, ISSN 2183-0568
- [48] Wang, W., Cheng, Y., Chen, H., Tan, G., Lv, Z., Bai, Y., Study on the Performances of Waste Crumb Rubber Modified Asphalt Mixture with Eco-Friendly Diatomite and Basalt Fiber. *Sustainability* 2019, 11, 5282. <https://doi.org/10.3390/su11195282>
- [49] Kalauni, K., Pawar, S.J., A review on the taxonomy, factors associated with sound absorption and theoretical modeling of porous sound absorbing materials. *J Porous Mater* 26, 1795–1819 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10934-019-00774-2>
- [50] Li, M., Keulen, W.N., Tijs, E., Ven, M.V.D., Molenaar, A., Sound absorption measurement of road surface with in situ technology, *Applied Acoustics* 88 (2015) 12–2, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.07.009>
- [51] Vaitkus, A., Čygas, D., Vorobjovas, V., Andriejauskas, T., Traffic/Road Noise Mitigation under Modified Asphalt Pavements, *Transportation Research Procedia* 14 (2016) 2698 – 2703, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.446>
- [52] Vaitkus A., Andriejauskas T., Vorobjovas V., Jagniatinskis A., Fiks, B., Zofka, E., Asphalt wearing course optimization for road traffic noise reduction, *Construction and Building Materials*, Volume 152, 15 October 2017, Pages 345-356, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.130>



Düşey Yönlü Deformasyon Araştırması

Vertical Deformation Research

Nazan YILMAZ^{1*}, Nilüfer DEMİRSOY²

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, n_berber@ktu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0615-8218>

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, demirsoynil@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4128-6466>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 7 Şubat 2022
Revizyon 9 Haziran 2022
Kabul 9 Haziran 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

*Mareograf,
Hassas Nivelman,
Deformasyon,
Dengeleme,
Statik Analiz*

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 Şubat 2022
Received in revised form 9 Haziran 2022
Accepted 9 Haziran 2022
Available online 28 Haziran 2022

Keywords:

*Mareograph,
Precision Leveling,
Deformation,
Adjustment,
Static Analysis*

Doi: 10.24012/dumf.1069472

* Sorumlu Yazar

ÖZ

Doğal veya yapay yapıların dış etkenler sonucunda şekil ve konum değişikliğini ölçme işlemlerine deformasyon ölçmeleri denir. Deformasyonların belirlenmesi amacıyla jeodezik kontrol ağları kurulmakta ve bu ağlarda farklı periyotlarda yapılan ölçülerin değerlendirilmesiyle deformasyon analizi gerçekleştirilmektedir. Jeodezik kontrol ağlarında deformasyon belirlenmesinde yatay ve düşey doğrultu için genellikle GNSS, yalnızca düşey doğrultu için genellikle hassas nivelman yöntemiyle yapılan ölçüler kullanılır. Kıyılarıdaki uzun dönemli deniz seviyesi değişimleri mareograf istasyonları yardımı ile izlenir. Bu ölçüler jeodezik açıdan yükseklik sistemleri için düşey datum belirleme çalışmalarında ve düşey yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi gibi birçok önemli alanda kullanılır. Bu alanlarda doğru ve güvenilir sonuçlara ulaşılabilmesi için mareograf istasyonunun herhangi bir yer kabuğu hareketinden etkilenmemesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, Trabzon liman sahası içerisinde bulunan mareograf istasyonu çevresinde düşey yönlü yer kabuğu hareketlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışma alanında kurulan bir nivelman ağında Haziran 2020 (I. Periyot), Ekim 2020 (II. Periyot) olmak üzere iki periyotta hassas nivelman ölçüsü yapılmıştır. Her iki periyotta da ölçülen yükseklik farkları serbest ağ yöntemine göre dengelenerek t-dağılımlı uyumsuz ölçüler testi uygulanmıştır. Periyotlar arasında ağda hareket oluşup oluşmadığı statik deformasyon modeli yöntemlerinden Θ^2 -ölçütü yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında uygulanan yöntemlerle ilgili hesaplamalar MATLAB program kodları kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca mareograf istasyonu çevresinde, yumuşak zeminli bölgelerde zamanla oluşabilecek yer kabuğu hareketlerinin belirli periyotlar arasında tekrarlı olarak hassas nivelman ve GNSS ölçüleri ile kontrol edilmesi gereklidir. Bu şekilde hem deformasyonlar önceden belirlenerek kontrol altına alınabilir hem de yapılan ölçüler gelecekte yapılacak olan bilimsel çalışmalara katkı sağlayacak önemli veri kaynakları olacaktır.

ABSTRACT

Measuring the shape and position change of natural or artificial structures as a result of external factors are called deformation measurements. Geodetic control networks are established to determine deformations and deformation analysis is performed by evaluating the measurements made in different periods in these networks. In determining deformation in geodetic control networks, generally GNSS is used for the horizontal and vertical direction, and the measurements made by precision leveling method are used only for the vertical direction. Long-term sea level changes on the coasts are monitored with the help of mareograph stations. These measurements are geodesically used in many important areas such as determination of vertical datum for height systems and determination of vertical earth's crust movements. In order to achieve accurate and reliable results in these areas, it is very important that the mareograph station is not affected by any earth crust movement. In this study, it is aimed to examine vertical crust movements around the mareograph station in Trabzon harbor area. For this purpose, in a leveling network established in the study area, precision leveling measurements were made in two periods, June 2020 (1st Period) and October 2020 (2nd Period). The height differences measured in both periods were balanced according to the free web method and the t-distributed mismatch test was applied. Whether movement occurs in the network between the periods was investigated by using the Θ^2 -criterion method, one of the static deformation model methods. The calculations regarding the methods applied within the scope of the study were made using MATLAB program codes. In addition, it is necessary to control the earth crust movements that may occur over time in soft ground areas around the mareograph station with precise leveling and GNSS measurements repeatedly between certain periods. In this way, deformations can be determined and controlled in advance, and the measurements made will be important data sources that will contribute to future scientific studies.

Giriş

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte deformasyon ölçmelerine duyulan önem artmaktadır. Doğal ya da yapay yapılarının dış etkenler sonucunda şekil ve konum değişikliğini ölçme işlemlerine deformasyon ölçmeleri denir. Mühendislik yapıları, teknik koşullarının izlenmesini ve tahmin edilmesini gerektirir. Bu amaçla, özel sensörler ve detektörler kullanılarak inşa edilenler gibi çeşitli sistemler ve ölçüm teknikleri kullanılır [1]. İzlenen yapı seçilen noktaların konumlarının doğru belirlenmesi için kullanılan jeodezik yöntemler, diğerleri arasında binaların, köprülerin ve barajların stabilite izlenmesinde önemli bir role sahiptir. Jeodezik izleme, çeşitli teknikler ve ölçüm yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir. En yaygın olanları küresel navigasyon uydu sistemleri, fotogrametri ve uzaktan algılamanın yanı sıra lazer taramadır. Bununla birlikte, klasik jeodezik kontrol ağları [2],[3] jeodezik yöntemlerin kullanımıyla mühendislik yapılarının deformasyon analizinde hala temel bir rol oynamaktadır. Yapısal deformasyon daha sonra bu ağ içindeki noktaların konumlandırılmalarının (yer değiştirmelerinin) zaman içindeki değişiklikleri temelinde belirlenir. Bu tür değişiklikler, periyodik ölçümler (ölçüm dönemleri) temelinde belirlenir [4]. Deformasyonu belirlemek için yaygın olarak kullanılan yöntem jeodezik izleme ağı yöntemi denir. İzleme ağı, hareketli alan üzerinde oluşturulan deformasyon kontrol noktalarından (obje noktaları) ve sabit alan dışında oluşturulan kontrol noktalarından oluşur. Ölçümler, izleme ağına periyodik aralıklarla gerçekleştirilir [5].

Deformasyonları izlemek üzere, jeodezik ve jeodezik olmayan birçok yöntem kullanılmaktadır. Jeodezik yöntemlerde, yatay ve düşey yöndeki deformasyonların izlenmesi, bu amaç için oluşturulmuş kontrol noktalarında (ağlarında), periyodik olarak yapılan klasik nivelman veya GPS ölçülerinin değerlendirilmesine ve analizine dayanır. Jeodezik olmayan yöntemlerde ise yapıda ve çevresinde oluşan deformasyonlar, deformasyona neden olan yük değişimleri, yer altı su seviyesi değişimi, gerilme, sıcaklık gibi değişik faktörlerin büyüklükleri ve değişimleri bazı özel donanım ve yöntemlerle ölçülür [6]. Türkiye'nin deprem kuşağında olması ve dış etkenlere de bağlı sebeplerle yer değiştirmelerin sürekli olarak izlenmesi gereksinimini ortaya çıkarmaktadır. Mareograf istasyonları, Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) kapsamında bulunan deniz seviyesi ve seviye değişimlerine etki eden meteorolojik parametreleri sayısal ve otomatik olarak periyodik sürelerde ölçerek kaydeden istasyonlardır. TUDES istasyonları ile kıyılarıdaki uzun dönemli deniz seviyesi değişimleri takip edilerek, Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı (TUDKA) için referans yüzey belirleme çalışmaları ile Türkiye için oluşturulacak jeoid modelleri çalışmalarına ve yükseklik belirleme çalışmalarına katkı sağlamaktadır. Bilimsel çalışmalar açısından son derece büyük öneme sahip mareograf istasyonları ve çevresinde meydana gelebilecek yer kabuğu hareketlerinin önceden belirlenebilmesi bu çalışmaların doğruluğu ve güvenilirliği açısından yapılması gerekli çalışmalardır.

Dünya' da oluşan yıkıcı ve ölümcül depremlerin ana nedenleri faylarla ilişkilidir. Fay, yer kabuğundaki kırığın her

iki tarafındaki kayalar birbirlerine göre ölçülebilecek miktarda hareket etmişlerse bu kırığa verilen addır. Fayların uzunlukları birkaç km' den birkaç bin km'ye ulaşabilmektedir. Fayların boyu depremlerin büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Sığ ve büyük depremlerde gözlenen fayın boyu yüzlerce kilometreye ulaşmaktadır. Faylar, fay düzlemi ile bloklar arasındaki hareket yönüne göre; ters fay, normal fay ve doğrultu atımlı faylar olarak sınıflanırlar. Bu sınıflar gerilmeler, makaslanmalar ve sıkışmalar sonucunda oluşur ve kendine etki eden kuvvete bağlı olarak farklı şekiller alır ve adlandırılırlar [7].

Karadeniz, Alp-Himalaya orojenik sisteminin Anadolu bölgesinde, kuzeyde Avrasya levhası ile güneyde Afrika-Arap levhaları arasında yer alır [8]. Günümüzde Alp-Himalaya sistemi tarafından kontrol edilen karmaşık bir sıkışma tektoniği etkisi altında olmasına karşın, oluşumunda açılma tektoniği rol oynamıştır. Bu sıkışma tektoniği yapıları, batıda Balkanidler, güneyde Pontidler, kuzeyde Kırım yayla dağları ve doğuda ise Kafkaslar ile ifade edilir [9].

Jeodezik kontrol ağlarında deformasyon belirlenmesinde yatay ve düşey doğrultu için genellikle GNSS, yalnızca düşey doğrultu için genellikle hassas nivelman yöntemiyle yapılan ölçüler kullanılır.

GNSS yöntemi ile düşey yönlü konum bileşeni belirleme duyarlılığının, yataya göre yaklaşık 2-3 kat daha düşük olduğu bilinmektedir [10].

Düşey deformasyonların araştırılması kapsamında Bolvadin ilçe merkezinde çalışmalar yapılmış ve bölgede meydana gelen düşey yönlü yüzey deformasyonları hassas nivelman tekniği ile incelenmiştir. Bu amaçla bölgeye 8 profil 81 noktadan oluşan nivelman ağı kurulmuştur. 3 kampanya şeklinde nivelman ölçüsü yapılmıştır. Değerlendirmeler sonucu toplam 360 mm'ye yakın deformasyonlar hesaplanmıştır. Bu deformasyonun nedeninin yeraltı su seviyelerindeki düşüşle beraber tektonik kökenli olabileceği düşünülmüştür [11].

Yöntem

Türkiye' nin aktif tektonik levhalara sahip olması ve deprem kuşağında olması sebebiyle yer kabuğunda hareketlenmeler söz konusudur. Kuzey Anadolu Fay'ının kuzeyinde kalan Doğu Karadeniz Bölgesinin de aktif olan faylara paralel olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada Doğu Karadeniz Bölgesi, Trabzon ilinde bulunan mareograf istasyonu çevresinde düşey yönlü yer kabuğu hareketleri araştırılmıştır.

Mareograf istasyonları deniz seviyesini ölçerken yüksek hassasiyetle ve doğrulukla çalışmalarını yapması jeodezi alanı için büyük öneme sahiptir. Yeryüzünde bir noktanın ortometrik yüksekliğini mm hassasiyetinde belirlerken sıfır yükseltili deniz seviyesi baz alınır. Tüm bu alanlarda doğru ve güvenilir sonuçlara ulaşılabilmesi için mareograf istasyonunun herhangi bir yer kabuğu hareketinden etkilenmemesi oldukça önemlidir. Ayrıca mareograf istasyonu çevresinde, yumuşak zeminli bölgelerde zamanla oluşabilecek yer kabuğu hareketlerinin belirli periyotlar arasında düzenli ve tekrarlı hassas nivelman ve GNSS

ölçüleri ile kontrol edilmesi gelecekte yapılacak olan bilimsel çalışmalara da katkı sağlayacaktır.

Bunun için bir nivelman ağı kurulmuş ve farklı periyotlarda ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen veriler ile deformasyon analizi araştırılmıştır. Yapılacak olan deformasyon analiziyle mareograf istasyonuna ait düşey yönde hareket olup olmadığı incelenmiştir.

Nivelman ağı oluşturulurken noktaların yerlerinin seçimine önem gösterilmiş olup dayanak ve test noktalarının homojen dağılmasına dikkat edilmiştir. Çalışmada hassas nivelman yöntemi kullanılarak güzergahlarda gidiş-dönüş nivelman ölçüsü yapılmıştır.

Kurulan nivelman ağına yapılan hassas ölçümler ile noktalar arasındaki yükseklik farkları belirlenmiştir. Ardından Matlab R2016b programlama dilinde yazılan algoritmalar ile nivelman ağına serbest ağ dengelemesi yapılmıştır. Dengeleme sonucunda bilinmeyenlerin ters ağırlık matrisi Q_{xx} ve dengelenmiş yükseklik değerleri elde edilmiştir. Bu hesaplamalar Haziran 2020 ve Ekim 2020 tarihlerinde olmak üzere iki periyot için yapılmıştır. İki periyotta dengeleme sonucundan elde edilen büyüklükler, statik deformasyon modeli olan Θ^2 -ölçütü deformasyon analizi yönteminde kullanılmıştır.

Hassas nivelman yöntemi

Hassas nivelman yöntemi, çok hassas ölçüler gereken köprü, baraj, liman, tünel vd. gibi büyük mühendislik yapılarında zamanla oluşabilecek deformasyonları belirleme çalışmalarında, ülke nivelman ağının oluşturulmasında ve yüksek hassasiyet gerektiren işlerde kullanılır.

Hassas nivelmanın ortalama hatası $0.5mm/\sqrt{km}$ 'dir. Yüksek hassasiyet gerektiği için kullanılan aletler, noktaların işaretleneceği yerler, ölçü ve hesaplama metodları bu hassasiyeti sağlayacak şekilde seçilmelidir [12].

Presizyonlu nivelman ölçmelerinde bunlara ek olarak, nivonun her kuruluşunda geri ve ileri noktalarda tutulan miralarda I. (ana) ve II. (yardımcı) bölümlendirmeler geri-I, ileri-I, ileri-II, geri-II şeklinde okunmakta (GIIG), böylelikle yükseklik farkları ikişer kez ölçülmektedir. Ayrıca nivelman noktaları arasındaki ölçmeler, doğruluğu artırmak ve kaba hataları ortaya çıkarmak için gidiş-dönüş olarak yapılır. Sonuçta noktalar arasındaki yükseklik farkları için dörder değer elde edilir [13]. Hassas nivelman çalışmalarında, birbirini izleyen iki nivelman noktası arasında gidiş-dönüş yükseklik farkı $\pm 4\sqrt{5}$ (mm) lik hatayı geçmemelidir [14].

Jeodezik ağların serbest dengelemesi ve uyumsuzuz ölçülerin belirlenmesi

Nivelman ağlarının serbest dengelenmesinde fonksiyonel ve stokastik model sırasıyla,

$$v = Ax - l \quad (1)$$

$$P_i = \frac{1}{s_i(km)} \quad (2)$$

biçiminde elde edilir. Burada v , ölçülere getirilecek düzeltmeler vektörünü; A , katsayılar matrisini; l , ölçüler vektörünü; x , bilinmeyenler vektörünü; P_i , ağırlık matrisini; s_i , noktalar arası mesafeyi belirtmektedir.

Gauss'un En Küçük Kareler (EKK) ilkesi ($v^T P v = \text{minimum}$) uyarınca normal denklemler,

$$A^T P A x = A^T P l \quad (3)$$

biçiminde elde edilir. Normal denklemlerin çözümü sonucunda ($\det(A^T P A) \neq 0$ kabulü ile) bilinmeyenler vektörü,

$$x = (A^T P A)^{-1} A^T P l \quad (4)$$

şeklinde bulunur. Burada $(A^T P A) = N$, normal denklem katsayılar matrisini; $(A^T P A)^+ = N^+ = Q_{xx}$, bilinmeyenlerin ters ağırlıklarını ifade etmektedir. Hesaplanan dengeleme bilinmeyenleri (x) ile bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri X_0 eklenerek yüksekliklerin kesin değerlerine ulaşılır.

$$X = X_0 + x \quad (5)$$

Dengeleme sonucunda düzeltmelerin ters ağırlık matrisi ve birim ölçünün varyansı sırasıyla,

$$Q_{vv} = Q_{ll} - A Q_{xx} A^T \quad (6)$$

$$m_0^2 = \frac{v^T P v}{n - u + d} \quad (7)$$

şeklinde elde edilir. Burada n , ölçü sayısını; u , bilinmeyen sayısını, d datum parametre sayısını ifade etmektedir. Duyarlılık hesapları şu şekilde yapılır:

Ölçülerin ortalama hatası,

$$m_i = \mp \frac{m_0}{\sqrt{P_i}} \quad (8)$$

Bilinmeyenlerin ortalama hatası,

$$m_{hi} = \mp m_0 * \sqrt{q_{xixi}} \quad (9)$$

Burada q_{xixi} : Q_{xx} matrisinin i. köşegen elemanıdır.

Uyuşumsuz ölçülerin belirlenmesi

Çeşitli amaçlarla yapılan jeodezik ölçüler, kaba ve uyuşumsuz ölçüleri de içinde barındırması çok sık karşılaşılan bir durumdur. Ölçü grubundaki kaba hatalar dengeleme modelinin düzeltme denklemleri kurulurken belirlenip ayıklanabilirken çeşitli nedenlerle oluşan uyuşumsuz ölçülerin bu şekilde belirlenmesi mümkün değildir. Ölçüler arasında, ölçü kümesinin dağılımına uymayan ölçüler olarak tanımlanabilen uyuşumsuz ölçüler, diğer ölçülerden ayrı özellik gösterirler ve kurulan matematik modele uymazlar. Rasgele ölçü hatalarına çok yakın büyüklükteki hataları içeren bu ölçüler, ancak dengeleme hesabı sonucunda uygulanan uyuşumsuz ölçü testi ile belirlenebilirler [15]. Uyuşumsuz ölçülerin tespit edilmesi için literatürde çeşitli analiz yöntemleri bulunmaktadır.

Tablo 1' de yer alan üç farklı test büyüklüğü, dengeleme sonucu elde edilen düzeltme değerlerinin farklı varyans değerleri ile normlandırılması anlamına gelmektedir. Baarda, teorik varyansı (σ_0^2), Pope, dengeleme sonucunda bulunan kestirilmiş varyansı (s_0^2) kullanırken, t testinde, uyuşumsuz ölçü ile hesaplanmış (s_0^2) yerine, bu uyuşumsuz ölçünün etkisi kaldırıldıktan sonraki varyans değeri (s_{0i}^2) kullanılmaktadır [16].

Tablo 1. Uyuşumsuz ölçü testleri özet çizelgesi.

Yöntem	Test	Dağılımı	Eşik değeri
Baarda	$T_{vi} = v_i / (\sigma_0 \sqrt{q_{vi}})$	N(0,1) Normal Dağılımlı	$N_{1-\alpha/2}$
Pope	$T_{vi} = v_i / (s_0 \sqrt{q_{vi}})$	τ_f Tau Dağılımlı	$\tau_{f,1-\alpha/2}$
t testi	$T_{vi} = v_i / (s_{0i} \sqrt{q_{vi}})$	t_{f-1} t-dağılımlı	$t_{f-1,1-\alpha/2}$

t-dağılımlı uyuşumsuz ölçüler testi korelasyonlu ve korelasyonsuz ölçüler için iki farklı şekilde hesaplanır. Korelasyonsuz ölçüler için test büyüklüğü hesabı,

$$T_{vi} = \frac{|v_i|}{s_{0i} \sqrt{q_{vivi}}} \quad (10)$$

$$s_{0i} = \pm \sqrt{\frac{1}{f-1} ([pvv] - \frac{v_i^2}{q_{vivi}})} \quad (11)$$

eşitlikleri ile bulunur. Ardından T_{vi} test büyüklüğünün maksimum değeri bulunarak t tablo değeri ile karşılaştırılır. $T_{vi_max} < t_{f-1,1-\frac{\alpha}{2}}$ olduğu durumlarda uyuşumsuz ölçü yoktur. $T_{vi} = T_{vi_max} \geq t_{f-1,1-\frac{\alpha}{2}}$ olduğu durumlarda ise i. ölçü uyuşumsuzdur. Bu ölçü uyuşumsuz ölçülerden çıkarılır veya yeniden ölçülür. Uyuşumsuz ölçü kalmayınca kadar aynı işleme devam edilir.

Θ^2 – Ölçütü yöntemi ile deformasyon analizi

Bu yöntemle deformasyon analizinde, her bir periyot ölçüsü ayrı ayrı serbest dengelenir, uyuşumsuz ölçüler ayıklanır ve her periyot için birim ağırlıklı ölçünün karesel ortalama hataları m_1 ve m_2 hesaplanır. Periyot ölçülerinin uyumlu olduğu test edildikten sonra, periyot ölçülerinin birim ağırlıklı varyanslarının birleştirilmesiyle daha uygun bir varyans değeri elde edilir [17].

Tüm periyotlardaki ölçüler ayrı ayrı dengelenerek, dengeli koordinatlar vektörü x , düzeltmelerin kareleri toplamı $v^T P v$, bilinmeyenlerin ters ağırlık matrisi Q_{xx} hesaplanır. İki periyot arasında anlamlı nokta hareketi olup olmadığı belirlemek için, periyotlardan elde edilen dengeli koordinatların farkları (d) hesaplanır. d fark vektörünün geometrik anlamı da vardır. İki ölçüden bulunan dengelenmiş koordinatlar Helmert dönüşümü ile birbiri üzerine çakıştırıldığında ortak noktadaki fark doğrudan doğruya d vektörünün elemanını verir. İki periyot için fark vektörü,

$$d = x_2 - x_1 \quad (12)$$

olarak hesaplanır. İki periyot için d fark vektörüne ait kovaryans matrisi Q_{dd} ,

$$Q_{dd} = Q_{x1x1} + Q_{x2x2} = (A_1^T P_1 A_1)^+ + (A_2^T P_2 A_2)^+ \quad (13)$$

olarak elde edilir. Doğrusal hipotezin düzeltmelerin ağırlıklı kareleri toplamına etkisi olan Θ^2 -Ölçütü,

$$\theta^2 = d^T Q_{dd}^+ d \quad (14)$$

şeklinde elde edilir. Ağın geometrik şeklinin ve datum parametrelerinin her iki ölçüm periyodunda da aynı olduğu durumlarda Q_{dd} 'nin rangı;

$$h = rang(Q_{dd}) \quad (15)$$

eşitliği ile hesaplanır. Her iki ölçüm kümesinin standart sapması,

$$s_0^2 = \frac{v_1^T P_1 v_1 + v_2^T P_2 v_2}{f_1 + f_2} = \frac{f_1 s_{01}^2 + f_2 s_{02}^2}{f_1 + f_2} \quad (16)$$

şeklinde elde edilir. Burada f_1 ve f_2 sırasıyla 1. ve 2. periyotlardaki ölçümlerin dengelemesi sırasında kullanılan serbestlik dereceleri; s_{01}^2 ve s_{02}^2 ise sırasıyla 1. ve 2. periyotlardaki ölçümlerin dengelemesi sonucunda elde edilen varyans değerleridir. Eşdeğerlik testinin test büyüklüğü (T),

$$T = \frac{\theta^2}{m_0^2 h} = \frac{d^T Q_{dd}^+ d}{m_0^2 h} \quad (17)$$

eşitliği ile hesaplanır. Test büyüklüğü T, F-tablo değeri ile karşılaştırılır. H_0 hipotezi $T < F_{n,f,1-\alpha}$ olduğu durumda geçerli, $T > F_{n,f,1-\alpha}$ olduğu durumlarda ise H_0 hipotezi geçerli değildir. Bu durumda iki ölçü periyodu arası geçen sürede ağ noktalarının bir ya da birden fazlasında deformasyon olduğuna $s=1-\alpha$ istatistik güven ile karar verilir. Ağda deformasyon olduğu belirlendikten sonra, ağda hareket eden noktalar tek tek belirlenir. Bunun için ağda bulunan bir nokta her seferinde hareketli, diğer noktalar ise sabit olduğu varsayımı ile nokta sayısı kadar θ^2 ölçütü değeri hesaplanır. Fark vektörü d ve kovaryans matrisi Q_{dd} ,

$$d = \begin{bmatrix} d_F \\ d_B \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$Q_{dd} = \begin{bmatrix} Q_{FF} & Q_{FB} \\ Q_{BF} & Q_{BB} \end{bmatrix} \quad (19)$$

eşitlikleri ile elde edilir. Burada B indisi, hareketli noktaları; F indisi, sabit noktaları göstermektedir. P_{dd} ağırlık matrisi,

$$P_{dd} = Q_{dd}^+ = \begin{bmatrix} P_{FF} & P_{FB} \\ P_{BF} & P_{BB} \end{bmatrix} \quad (20)$$

eşitliği ile yani Q_{dd} matrisinin tersi alınarak elde edilir. B ile hareketli nokta olarak alınan nokta her adımda d_B alt vektör olarak yazılır ve ağ nokta sayısı kadar aykırılık etkisi hesaplanır. Alt matrisler Gauss yöntemi ile indirgenerek,

$$d_B = d_B - P_{BB}^{-1} P_{BF} d_F \quad (21)$$

$$P_{FF} = P_{FF} - P_{FB} P_{BB}^{-1} P_{BF} \quad (22)$$

hesaplanır. θ^2 ölçütü değeri,

$$\theta^2 = d^T Q_{dd}^+ d = d_F^T P_{FF} d_F + d_B^T P_{BB} d_B \quad (23)$$

$d_F^T P_{FF} d_F$ sabit olduğu varsayılan noktaya ait aykırılık, $d_B^T P_{BB} d_B$ hareketli olduğu varsayılan her noktaya ait aykırılık olarak bağımsız iki bileşene ayrılır.

$$(\theta^2)_i = (d_B^T P_{BB} d_B)_i \quad (24)$$

Burada n, nokta sayısıdır. Toplam aykırılık payı en büyük olan $(\theta^2)_{\max} = \max((\theta^2)_i)$ olan noktada, $s=1-\alpha$ istatistik güven ile deformasyon olduğuna karar verilir. Ağda hareketli başka nokta veya noktalar bulunup bulunmadığını belirlemek için d ve Q_{dd} 'ye bir S-dönüşümü yapılarak geriye kalan $(n-1)$ noktadan yararlanarak yeni bir datum verilir. d ve Q_{dd} 'de hareketli noktaya ait elemanlar en son satır ve sütunlara atılır. G matrisi ile S-transformasyon matrisi,

$$S_i = I - GG^T \quad (25)$$

eşitliği ile elde edilir. d ve Q_{dd} matrisi,

$$d_i = S_i d \quad (26)$$

$$Q_{ddi} = S_i Q_{dd} S_i^T \quad (27)$$

biçiminde dönüştürülür. i. dönüşümden sonra fark vektörü ve bunun ters ağırlık matrisi,

$$d_{i=} \begin{vmatrix} d_D \\ d_N \end{vmatrix} = S_i \begin{vmatrix} d_F \\ d_B \end{vmatrix} = S_i d \quad (28)$$

$$Q_{adi} = \begin{vmatrix} Q_{DD} & Q_{DN} \\ Q_{ND} & Q_{NN} \end{vmatrix} \quad (29)$$

şeklinde alt matrislere ayrılır. Burada D indisi, datum noktalarını; N indisi, datum dönüşümüne katılmayan noktaları; d_N , toplam aykırılıktaki payları en büyük olan (Θ^2)mak noktalarına ait d_B değerinin sonraki değerini göstermektedir. i. belirleme adımından sonra kalan aykırılık,

$$\theta_{kalan}^2 = d_D^T Q_{DD}^+ d_D \quad (30)$$

eşitliği ile hesaplanır. Test büyüklüğü,

$$T_D = \frac{(\theta)_{kalan}^2}{\sigma_0^2 h_D} > F_{h_D, f_D, 1-\alpha} \quad (31)$$

olduğu durumda ağda hareketli nokta vardır. Burada yeni hareketli nokta, yukarıdaki işlemler tekrar edilerek belirlenir. Son bir S-transförmasyonu ile ağda hareketsiz kalan noktalar P_D , hareketsiz olduğu tespit edilen noktalar P_N ve deformasyon büyüklükleri d_N elde edilir [18].

Uygulama

Çalışmada Doğu Karadeniz bölgesi, Trabzon ili, deniz limanı sahası içerisinde bulunan TRBZ adlı mareograf istasyonu çevresindeki hareketliliğin araştırılması amaçlanmıştır.

Çalışma alanı özellikleri

4.664 km² yüz ölçümüne sahip Trabzon ili, Doğu Karadeniz Dağlarının oluşturduğu yayın ortasındaki Kalkanlı dağlık kütesinin kuzeye bakan yamaçlarında 38° 30' – 40° 30' doğu meridyenleri ile 40° 30' – 41° 30' kuzey paralelleri arasında yer almaktadır. Kuzeyinde Karadeniz, güneyinde Gümüşhane ve Bayburt, doğusunda Rize, batısında Giresun ili bulunmaktadır. Trabzon Limanı; kuzeyde 40 57' 30" - 41 06' 36" enlemleri, doğu'da 40 02' 30" - 39 25' 00" boylamları arasında yer almaktadır. Şekil 1'de Trabzon limanı gösterilmektedir.



Şekil 1. Trabzon limanı [19].

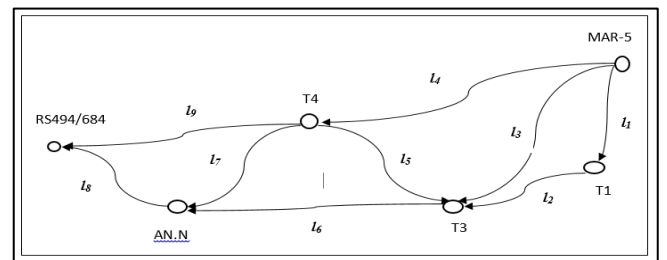
Çalışma alanı tektonik yapısı

Coğrafi konum açısından Trabzon ili, Doğu Karadeniz bölgesinde yer almaktadır. Karadeniz sahillerinin doğusu boyunca uzanan yaklaşık 500 km uzunluğunda, 200 km genişliğinde olan Doğu Pontidler'in Kuzey Zonu'nda yer almaktadır [20].

Güncel jeolojik, jeofizik ve GPS çalışmaları Gürcistan'daki aktif ters fay ve kıvrım sisteminin Karadeniz'e doğru devam ettiğini ve aktif basınç deformasyonunun Kafkaslar' dan Karadeniz'e doğru azaldığını göstermektedir. Karadeniz'in şelf bölgesini derin basen kısmından ayıran basınç deformasyonuna ait aktif ters faylar, Trabzon sahilinden yaklaşık 5-20 km uzaklıkta, sahile paralel uzanmaktadır. Karadeniz'in güneye doğru oblik yitiminden kaynaklanan aktif deformasyon, şelf bölgesindeki itki fayları ve karadaki doğrultu atımlı faylar tarafından farklı oranlarda paylaşılmıştır. Bu nedenle KAF'ın yıllık sağ yanal hareketi GPS verilerine göre 24 mm/yıl, Kafkaslar'da 3-5 mm/yıl ve DAF 'ta 9 mm/yıl iken, Doğu Pontidler'in kuzeye doğru itilmesi yılda birkaç mm'dir [21].

Nivelman ağının kuruluşu

Trabzon mareograf istasyonu çevresinde yer kabuğu hareketlerini belirlemek amacıyla bir jeodezik nivelman kontrol ağı kurulmuştur. Kurulan bu nivelman ağı, mareograf istasyonu yakınında bulunan MAR-5 noktası, 1 nolu çömllekçi sokakta bulunan RS494/684 noktası, Trabzon deniz limanı sahası içerisinde yeni tesis edilen T1, T3, T4 ve AN.N noktalarından oluşmaktadır. Mareograf istasyonuna ait RS noktasının (MAR-5) yükseklik değeri Harita Genel Müdürlüğünden temin edilmiştir. Diğer RS494/684 noktasının yükseklik değeri ise Trabzon Belediyesinden temin edilmiştir. Şekil 2' de nivelman ağı gösterilmiştir.



Şekil 2. Nivelman ağı.

Nivelman ağında Haziran 2020 (I. Periyot), Ekim 2020 (II. Periyot) olmak üzere iki periyot hassas nivelman ölçüsü yapılmıştır. Tüm güzergahlarda, gidiş ve dönüş olmak üzere hassas nivelman yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemi uygularken arazinin topoğrafik yapısına, hava koşullarına, alet ile mira arasındaki mesafenin 30 m' yi geçmemesine ve okunan yükseklik değerlerinin 0.50 m' nin altına düşmemesine özen gösterilmiştir. Bu şekilde ağa ait tüm güzergahlarda hassasiyeti yüksek ölçüler elde edilmeye çalışılmıştır.

Nivelman ağı ölçülerinin dengelemesi

Her periyotta ölçülen yükseklik farkları serbest ağ yöntemine göre MATLAB R2016b adlı programda yazılan algoritmalarla dengelenmiştir.

Serbest ağ dengelemesi için tüm güzergâhlardan elde edilmiş olan noktalara ait yükseklik farkları ΔH_i , geçki uzunlukları kilometre cinsinden S_i (km) ve ağ noktalarının yaklaşık yükseklik değerleri programda girdi veri olarak kullanılmıştır. Her iki periyotta da t-dağılımlı uyuşumsuz ölçüler testi uygulanmış ve her periyotta tek bir güzergâh için uyuşumsuz ölçüye rastlanmıştır. Bulunan uyuşumsuz ölçüler çıkarılarak dengelemeye devam edilmiştir.

Böylece uyumlu ölçülerle yapılmış olan serbest ağ dengelemesi sonucu (5) eşitliğinden ağ noktalarının dengeli yükseklikleri (x_1, x_2), düzeltmelerin kareleri toplamı (v_1, v_2) ve bilinmeyenlerin ters ağırlık matrisleri (Q_{x1x1}, Q_{x2x2}) hesaplanmıştır. Ayrıca (9) eşitliğinden ağıdaki noktalara ait yüksekliklerin karesel ortalama hataları (m_{ni}) hesaplanmıştır.

Nivelman ağında deformasyon analizi

9 Haziran 2020 başlangıç periyodu (t_0) ve 9 Ekim 2020 (t_1) kabul edilmiştir. (t_0) ve (t_1) zamanları arasında oluşan deformasyonlar statik deformasyon modeli ile belirlenmiştir. Statik deformasyon yöntemlerinden Θ^2 - ölçütü yöntemi MATLAB R2016b programında yazılan algoritmalar ile (t_1)-(t_0) zamanları arasında ağda deformasyon olup olmadığına karar verilmiştir. (t_1)-(t_0) Periyotları için deformasyon analizinde;

Θ^2 - ölçütü yöntemiyle deformasyon analizinde girdi veriler olarak serbest ağ dengelemesi sonucunda elde edilen ağ noktalarının dengeli yükseklikleri (x_1, x_2), düzeltmelerin kareleri toplamı (v_1, v_2) ve ters ağırlık matrisleri (Q_{x1x1}, Q_{x2x2}) kullanılmıştır.

Θ^2 - ölçütü yöntemiyle deformasyon analizinde, (14) eşitliğinden Θ^2 -ölçütü, (16) eşitliğinden birim ölçünün öncül ortalama hatası(s_0^2), (17) eşitliğinden test büyüklüğü (T) hesaplanmıştır. Test büyüklüğü F-tablo değeri (q) ile karşılaştırılarak global test yapıp deformasyon olup olmadığına karar verilmiştir.

Bulgular

Nivelman ağı dengelemesi sonuçları

I. Periyot ve II. periyot nivelman ağı dengelemesinde t-dağılımlı uyuşumsuz ölçüler testi yapılmıştır. Bunun

sonucunda her periyot için tek bir güzergahta uyuşumsuz ölçüye rastlanmış olup bu ölçüler çıkarılarak dengelemeye devam edilmiştir.

Aşağıdaki Tablo 2' de I. ve II. periyot nivelman ağı için yapılan uyuşumsuz ölçüler test sonuçları gösterilmiştir. Korelasyonsuz ölçüler için s_{0i} hesabı (11) eşitliğinden, test büyüklüğü ise (10) eşitliğinden hesaplanır. Test büyüklüğü, t tablo değeri ile karşılaştırılarak uyuşumsuz ölçünün varlığına karar verilir.

Tablo 2. Nivelman ağı uyuşumsuz ölçüler testi

	I. Periyot	II. Periyot
T_{vi_max}	2.4841	1.0862
t_tablo	4.3027	4.3027
Karar	$T_{vi_max} < t_tablo$ olduğundan uyuşumsuz ölçü yoktur.	$T_{vi_max} < t_tablo$ olduğundan uyuşumsuz ölçü yoktur.

I. Periyot nivelman ağı dengelemesi sonuçları

I. Periyot nivelman ağındaki noktalara ait ölçülerinin dengelenmesi sonucu dengelenmiş kesin yükseklik değerleri Tablo 3' te gösterilmiştir.

Tablo 3. I. Periyot dengelenmiş kesin yükseklikler.

Nokta adı	Kesin yükseklikler(m)
MAR-5	0.8885
T1	1.9770
T3	2.6164
T4	2.3621
AN.N	2.6413
RS494/684	5.1674

Nivelman ağındaki noktalara ait I. Periyot ölçülerinden elde edilen yüksekliklerin karesel ortalama hataları (m_h) Tablo 4' te gösterilmiştir.

Tablo 4. I. Periyot yüksekliklerin karesel ortalama hataları.

Nokta adı	Yüksekliklerin karesel ortalama hataları(mm)
MAR-5	1.30
T1	1.27
T3	1.10
T4	1.15
AN.N	1.82
RS494/684	2.77

Tablo 4'den de görüldüğü üzere ağda bulunan noktalardan T3 nolu nokta 1.10 mm ile minimum karesel ortalama

hataya, RS494/684 nolu nokta ise 2.77 mm ile maksimum karesel ortalamaya sahiptir.

II. Periyot nivelman ağı dengelemesi sonuçları

II. Periyot nivelman ağındaki noktalara ait ölçülerinin dengelenmesi sonucu dengelenmiş kesin yükseklik değerleri Tablo 5' te gösterilmiştir.

Tablo 5. II. Periyot dengelenmiş kesin yükseklikler.

Nokta adı	Kesin yükseklikler(m)
MAR-5	0.8628
T1	1.9505
T3	2.5899
T4	2.3346
AN.N	2.608
RS494/684	5.3034

Nivelman ağındaki noktalara ait II. Periyot ölçülerinden elde edilen yüksekliklerin karesel ortalama hataları (mh) Tablo 6' da gösterilmiştir.

Tablo 6. II. Periyot yüksekliklerin karesel ortalama hataları.

Nokta adı	Yüksekliklerin karesel ortalama hataları(mm)
MAR-5	0.18
T1	0.18
T3	0.15
T4	0.18
AN.N	0.20
RS494/684	0.29

Tablo 6'dan da görüldüğü gibi ağda bulunan noktalardan T3 nolu nokta 0.15 mm ile minimum karesel ortalama hataya, RS494/684 nolu nokta 0.29 mm ile maksimum karesel ortalamaya sahiptir.

Haziran ve Ekim aylarında iki periyot ölçü olarak yapılan hassas nivelman ölçüleri sonucunda her iki periyotta da T3 nolu noktaya ait yükseklik karesel ortalama hata değeri minimum, RS494/684 nolu noktaya ait yükseklik karesel ortalama hata değeri maksimum olarak bulunmuştur.

Nivelman ağı deformasyon analizi sonuçları

Θ^2 - ölçütü yöntemiyle deformasyon analizi sonuçları Tablo 7' de sunulmuştur.

Tablo 7. Nivelman ağı Θ^2 -ölçütü yöntemiyle deformasyon analizi değerleri

Testler	Sonuçlar
Θ^2 -Ölçütü	0.0313
s_0^2	8.7430
Test	$7.1513 \cdot 10^{-4}$
Büyükülüğü	
F-tablosu (q)	4.3874

Karar	T<F Deformasyon n yok
-------	-----------------------------

Tablo 7' de; oluşturulan nivelman ağında Θ^2 - Ölçütü yöntemiyle deformasyon analizi sonucunda (t_1)- (t_0) periyotları arasında hesaplanan test büyüklüğü değerinin (T), F tablo değerinden küçük olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda Haziran 2020 ile Ekim 2020 periyotları arasında geçen sürede, kurulmuş olan nivelman ağında herhangi bir deformasyonun olmadığı görülmektedir.

Sonuçlar

Mareograf istasyonları jeodezik açıdan büyük öneme sahip olup deniz seviyesini ölçmelerini sağlayan istasyonlardır. Bu ölçüler jeodezi alanında yükseklik sistemleri için düşey datum belirleme çalışmalarında ve düşey yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesinde kullanılır. Mareograf istasyonları deniz seviyesini ölçerken yüksek hassasiyetle ve doğrulukla çalışmalarını yapması jeodezi alanı için önemlidir.

Bu çalışmada Doğu Karadeniz bölgesi, Trabzon ili, deniz limanı sahası içerisinde bulunan TRBZ adlı mareograf istasyonu çevresindeki düşey yönlü hareketliliğin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışma alanında bir jeodezik nivelman kontrol ağı kurulmuştur. Kurulan nivelman ağında Haziran 2020 (I. Periyot), Ekim 2020 (II. Periyot) olmak üzere iki periyotta hassas nivelman ölçüsü yapılmıştır. Tüm güzergahlarda gidiş ve dönüş olmak üzere hassas nivelman yöntemi kullanılmıştır. Her periyotta ölçülen yükseklik farkları serbest ağı dengelemesi yöntemine göre MATLAB R2016b adlı programda yazılan algoritmalar ile dengelenmiştir. 9 Haziran 2020 başlangıç periyodu (t_0) ve 9 Ekim 2020 (t_1) kabul edilmiştir. (t_0) ve (t_1) zamanları arasında oluşan deformasyonlar statik deformasyon modeli ile belirlenmeye çalışılmıştır. Statik deformasyon yöntemlerinden Θ^2 - ölçütü yöntemi seçilmiş olup, yine MATLAB R2016b programında yazılan algoritmalar ile deformasyon analizi yapılmıştır. Yapılan deformasyon analizi sonucunda Tablo 7' de görüldüğü üzere:

Nivelman ağında Θ^2 -Ölçütü yöntemine göre, Test büyüklüğü değeri (T) $7.1513 \cdot 10^{-4}$, F tablo değeri ise 4.3874 olarak hesaplanmıştır. Yani T test büyüklüğü değeri F tablo değerinden küçük olduğu görülmektedir.

Bu durum oluşturulan nivelman ağında geçen zaman içinde deformasyon olmadığı anlamına gelmektedir. Yapılan bu Global test, yaklaşık 4 aylık bir periyotta çalışma alanı olarak seçilen Trabzon mareograf istasyonu çevresinde düşey yönlü anlamlı bir hareketin olmadığını göstermektedir.

Çalışma bölgesinde deformasyon çıkmamış olmasının nedeni olarak; çalışma bölgemiz olan TRBZ isimli mareograf istasyonu çevresindeki zemin yapısının sert olması ve ölçü tekrarının 4 ay gibi kısa bir periyotta yapılması olarak düşünülmüştür.

Ancak yapılan bu çalışmalarda, periyot sayısı artırılıp uzun dönemli olarak ölçümler yapıldığı takdirde deformasyonun varlığına dair farklı sonuçlar elde edilebilir. Bu sebeple periyotlar arası sürenin daha uzun tutularak çalışmaların farklı periyotlarda düzenli aralıklarla tekrarlanması önerilmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur”.

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”.

Kaynaklar

- [1] Meo, M. ve Zumpano, G. “On The Optimal Sensor Placement Techniques For A Bridge Structure”. Eng. Struct., 27, 1488–1497 2005.
- [2] Baselga, S., García-Asenjo, L. And Garrigues, P. “Deformation Monitoring And The Maximum Number Of Stable Points Method”. Measurement, 70, 27–35, 2015.
- [3] Pingue, F., Petrazzuoli, S.M. Obrizzo, F., Tammara, U., De Martino, P., Zuccaro, G. “Monitoring system of buildings with high vulnerability in presence of slow ground deformations (The Campi Flegrei, Italy, case)”. Measurement, 44, 1628–1644, 2011.
- [4] Wisniewski, Z. ve Kaminski, W. “Estimation and Prediction of Vertical Deformations of Random Surfaces, Applying the Total Least Squares Collocation Method”. Sensors, 20, 3913,2020.
- [5] Tanır Kayıkçı, E. ve Yalçınkaya, M. “Determination of Horizontal Movements by Static Deformation Models: A Case Study on the Mining Area”. Experimental Techniques, 39, 70-81, 2015.
- [6] Kalkan, Y. ve Alkan, R.M. “Mühendislik Yapılarında Deformasyon Ölçmeleri”. 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, Kasım, İTÜ, İstanbul, Türkiye, 2005.
- [7] Doğan, A. Yüzey Deformasyonlarının Hassas Nivelman Tekniği ile Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye, 2019.
- [8] Tari, E., Şahin, M., Barka, A., Reilinger, R., King, R.W., McClusky, S. ve Prilepin, M. “Active Tectonics Of The Black Sea With GPS”. Earth Planets Space, 52, 747-751, 2000.
- [9] Maden, N. ve Dondurur, D. “Orta Karadeniz Sirtının Tektonik ve Kabuk Yapısının Gravite Verileri Yardımıyla Belirlenmesi”, Jeofizik, 17, 25-37, 2012.
- [10] Yalvaç, S., Üstün, A., Tuşat, E. , Doğanalp, S. ve Abbak, R. A. “ Düşey Yönlü Deformasyon Belirleme Çalışmalarında Tekrarlanabilirliklerin İncelenmesi”. TUJK 2011 Sabit GNSS İstasyonları Ağı ve Analizi Çalıştayı, İstanbul, 23-25 Kasım 2011.
- [11] Çalışkan, K. Bolvadin/Afyonkarahisar Kent Merkezinde Meydana Gelen Düşey Deformasyon Hızlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye, 2021.
- [12] Ünver, M. Düşey Yöndeki Yerkabuğu Hareketlerinin Duyarlılık Nivelman Ölçüleri ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü, Trabzon, Türkiye, 1988.
- [13] Ekinci, S.K. Sayısal Presizyonlu Nivelar ve Sayısal Presizyonlu Nivelman Tekniğinin Doğruluğu, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [14] Aydın, Ö. Hassas Yükseklik Ölçmeleri, Y.T.Ü Basım Yayın Merkezi, İstanbul, Türkiye, 1998.
- [15] Şişman, Y. “Uyuşumsuz Ölçü Gruplarının Belirlenmesi Yöntemleri”. Harita Dergisi, 133, 74- 89, 2005.
- [16] Erol, S. GPS ve Nivelman Ölçüleriyle Deformasyonların Belirlenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [17] Doğanalp, S., Turgut, B. ve İnal, C. “Yükseklik Ağlarında Q² Ölçütü ve Kalman Filtreleme Yöntemi ile Deformasyon Analizi”. Teknik- Online Dergi, 5, 2, 49-59, 2006.
- [18] Konakoğlu, B. Beton Barajlarda Deformasyonların Statik, Kinematik ve Dinamik Modeller ile Belirlenmesi: Artvin Deriner Barajı Örneği, Doktora Tezi, K.T.Ü, Trabzon, Türkiye, 2019.
- [19] <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/trabzon-limanina-gelen-yuksek-talep-turkiyeye-guvenin-isareti/1043231> 10 Ocak 2021.
- [20] Keskin, S. Güneydoğu (GD) Karadeniz Sahil Kesiminin (Trabzon Yöresi) Denizel Taraçaları ve Aktif Tektoniği, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü, Trabzon, Türkiye, 2007.
- [21] Keskin, S., Bektaş, O., Eyüboğlu, Y. ve Yücel, C. “GD Karadeniz Sahil Kesiminin (Trabzon Yöresi) Aktif Tektoniği”. Türkiye Kuvaterner Sempozyumu, Mayıs, İTÜ Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, TURQUA-VI, 138- 150, 2007.



Geleneksel bitümlü sıcak karışım üstyapı tabakalarının dinamik rijitlik modülünün tahmini ve Marshall dizayn yöntemi verileriyle karşılaştırılması

Estimation of dynamic modulus of stiffness of conventional bituminous hot mix pavement layers and comparison with Marshall Design method data

İhsan Güzel^{1*}, Ahmet Benli²

¹ Bingöl Üniversitesi, İnşaat Muhendisliği Bölümü, iguzel@bingol.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0746-070X>

² Bingöl Üniversitesi, İnşaat Muhendisliği Bölümü, ahbenli@bingol.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3557-4704>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 18 Şubat 2022
Revizyon 27 Nisan 2022
Kabul 19 Haziran 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

Bitüm, agrega, mekanistik ampirik, dinamik modül, marshall dizaynı, ana eğri

ÖZ

Bitümlü sıcak karışım en önemli mekanik özelliklerinden biri olan dinamik rijitlik modülünün ülkemizde yaygın olarak kullanılan Marshall dizaynı verileriyle ilişkisinin incelenmesinin tasarımcıların kaplama performansı ve yaşam döngü maliyetlerinin analizlerine katkıda bulunacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada kalker taş ocağından üretilen agregayla bitümlü temel, binder, aşınma karışımlarının Marshall dizaynından optimum bitümü tespit edilmiştir. Mekanistik- ampirik tasarım yönteminde ikinci ve üçüncü seviye projelerde kullanılmasına izin verilen 1999 Witczak Modeliyle optimum bitümlü karışımların farklı sıcaklık ve frekanslarda dinamik rijitlik modülleri hesaplanmıştır. Optimum bitümlü karışımların 21.1°C sıcaklık referans alınarak farklı yükleme sürelerinde dinamik modül ana (master) eğrileri çizilmiştir. Dinamik rijitlik modülünü agreganın maksimum dane boyutuyla artırdığından aşınma tabakası karışım gradasyon sınırlarının yeniden düzenlenmesi proje içerisinde yükleme süresi değişimine göre üst yapı tabaka kalınlıklarında değişiklikler yapılabileceği tespit edilmiştir. Marshall dizaynı verileriyle dinamik rijitlik modülü grafiklerinde optimum bitümde bu verilere ait değerlerin dinamik modülün maksimum yaptığı, bitümlü temel ve binder karışımlarında bir miktar bitüm azaltılması durumunda optimum bitümde tahmin edilen dinamik modüle yaklaşılabileceği belirlenmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 February 2022
Received in revised form 27 April 2022
Accepted 19 June 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Bitumen, aggregate, mechanistic empirical dynamic module, marshall design master curve

ABSTRACT

It is thought that examining the relationship between the dynamic stiffness module, which is one of the most important mechanical properties of bituminous hot mix, and Marshall design data, which is widely used in Turkey, will contribute to the designers' analysis of coating performance and life cycle costs. In this study, optimum bitumen was determined from Marshall design of bitumen base, binder and abrasion mixtures with aggregate produced from limestone quarry. Dynamic stiffness modules of optimum bituminous mixtures at different temperatures and frequencies were calculated with the 1999 Witczak Model, which is allowed to be used in second and third level projects in the mechanistic-empirical design method. Dynamic module master curves were drawn at different loading times by taking the optimum bituminous mixtures as a reference to the 21.1oC temperature. In the dynamic stiffness modulus graphs with Marshall design data, it has been determined that the values of these data at optimum bitumen are maximized by the dynamic modulus, and in the case of some bitumen reduction in bituminous base and binder mixtures, the dynamic modulus estimated at the optimum bitumen will be approached.

Doi: 10.24012/dumf.1075656

* Sorumlu Yazar

Giriş

Dinamik modül $|E^*|$, esnek üstyapının yüklü veya yüksüz durumdayken şekil ve yer değiştirmelerini belirleyen bitümlü sıcak karışım (BSK) tabakalarının rijitlik ölçülerinden biridir [1].

Esnek üst yapıların tasarım, analiz ve performans değerlendirmesinde dikkate alınan tabakalarını rijitliği, yükleme hızı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak $|E^*|$ tanımlanmaktadır [2]. Taşıt hızlarının bir fonksiyonu olan yükleme süreleri [3] ve kaplama sıcaklığı tepkilerinden kaynaklı bozulmalarla yüksek oranda ilişkilidir.

Tasarımcıya malzeme seçimi olanaklarıyla çeşitli alternatifler sağlayan, diğer yöntemlerin (mekanistik, ampirik) yetersizliklerini gidermeye çalışan [4] laboratuvar ve saha testlerinin bir kombinasyonu olan mekanistik – ampirik (M-A) yöntemine dayalı AASHTO 2002 Kaplama Tasarımı Rehberinde, BSK tabakalarında en sık gözlenen yorulma ve tekerlek izi hasarlarının tahmini için $|E^*|$ önemli bir girdidir [5]. M-A yöntemde proje girdilerinin doğruluk ve belirsizlik durumuna göre üç hiyerarşik seviye belirlenmiştir [6]. Birinci seviye projeler için $|E^*|$ Superpave tasarımının bağlayıcı değerleriyle beraber laboratuvar deneylerinden tespit edilmektedir. İkinci seviye projeler için $|E^*|$ deneyi gerekmezken; bağlayıcılar için geleneksel bitüm deneyleri yapılmaktadır. Üçüncü seviye projelerde, dinamik modül ve bağlayıcı deneyleri yapılmamaktadır [7]. İkinci seviye analizlerde, bağlayıcı viskozitesi ve sıcaklık arasındaki ilişkiye dayalı olarak bitüm test verileri kullanılarak belirlenen sıcaklık veya frekans referans alınarak, düzeltilmiş frekans, sıcaklık değişimlerine göre çizilen ana eğrisinden tabakaların $|E^*|$ hesaplanmaktadır [8].

Mekanistik analizle karışımların uzun vadeli performansını tahmin edilmesinde $|E^*|$ etkin bir parametredir. Ancak $|E^*|$ deneylerinde ekipman, insan gücü, zaman veri analizi, gereksinimleri, numune üretim ve maliyetlerle ilgili sınırlamalar nedeniyle M-A ve mekanistik üstyapı analizi ve tasarımın geniş çapta kullanımını ciddi şekilde kısıtlamıştır [1-9].

Pahalı ve zaman alıcı laboratuvar test gerekliliklerini hafifletmek için 1990'lı yıllardan itibaren, hacimsel hesaplamalara göre yapılan karışım numuneleri değerlendirilerek tahmin modelleri geliştirilmiştir. Günümüzde karışım tipi ve dizaynlarının değişmesi, alternatif malzeme ve geri dönüşüm kullanımı artmasından dolayı yeni tahmin modelleri ve geliştirilmiş modellerin kalibrasyon yapılarak yeni modeller geliştirilmeye çalışılmaktadır [10-11-12]. AASHTO 2002 M-A Kaplama Tasarım Rehberinde ikinci ve üçüncü hiyerarşik seviyeler için $|E^*|$ tahmininde, Witczak ve Hirsch model denklemlerinin uygulanması kabul edilmiştir [13].

Ülkemizde AASHTO 1993 rehberi esas alınarak 2008 yılında yayınlanan ve yürürlükte olan Karayolları Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberiyle [14] M-A yöntemine geçiş yapılmaya çalışılmakta olup; bu rehberde agregaların kayaç türleri dikkate alınmadan, genel olarak

belirlenen tabakaların izafi mukavemet katsayılarıyla tasarım yapılmaktadır..

Bazalt cinsi agregalı karışımlarda kalker cinsi agregalı karışımlara göre ortalama % 10- %20 arasında daha fazla bitüm kullanılmaktadır. Tabaka tasarımı ve analizinin proje bazında agregaların üretileceği kayaç türlerine göre yapılması, üst yapı performansını ve maliyet değerlendirmelerini etkileyecektir.

Aşınma, binder, bitümlü temel tabakalarının şartname sınırlarını sağlamak koşuluyla genellikle aynı taş ocağından temin edilen agregalarla üretilmektedir. Trafik yükü, iklim ve çevre koşullarına en fazla etkilenen bu tabakalarda malzeme olarak en fazla miktarda kullanılan agreganın cinsine göre $|E^*|$ belirlenmesi, yaşam döngüsünde ve tabakalarda alternatif malzeme seçeneklerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir.

Literatür incelemelerinde ise aynı taş ocağından temin edilen agregalarla üretilen bitümlü temel binder ve aşınma tabakalarının $|E^*|$ lerinin birlikte karşılaştırılıp değerlendirildiği bazalt agregalı çalışma [15] haricinde bir araştırma olmadığı tespit edilmiştir.

Bu nedenle BSK tabakalarının tasarımında yaygın olarak uygulanan Marshall dizaynı için kalker taş ocağından temin edilen agregalarla hazırlanan tabakaların Marshall numunelerinin verileriyle M-A Tasarım Rehberinde ikinci, üçüncü hiyerarşik seviye projelerde tabakaların tahminine izin verilen $|E^*|$, ilişkisi incelenmiştir.

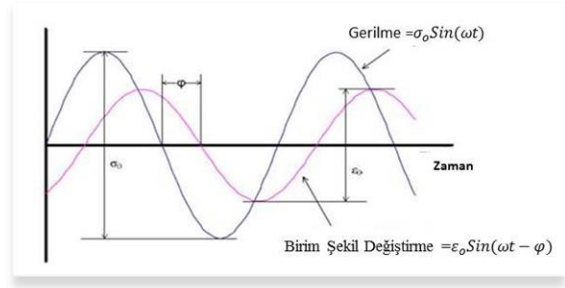
Bu çalışma proje bazında tasarımcıların performans, ekonomiklik değerlendirme ve aynı zamanda analitik çalışmalara katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Dinamik modül

M-A kaplama tasarımında, başarılı ve güvenilir bir tasarım için, malzeme özelliklerinin doğru temsili zorunludur. Bu özelliklerin biri de karışımların kompleks modülüdür. Kompleks modülün iki bileşeninden biri olan faz açısı belirli bir sıcaklık ve yükleme frekansında malzemenin viskoz ve elastik davranışının ölçüsü, diğer bileşeni olan dinamik modül ise belirli sıcaklık ve frekansta malzemenin rijitliği olarak tanımlanmaktadır [16].

Papazian tarafından 1962 yılında viskoz davranış gösteren asfalt betonu karışımların performansını değerlendirme çalışmasında, kompleks modülü kavramı geliştirilmiştir [17]. 1970'lerden başlanarak Asfalt Enstitüsü tarafından bu kavram kullanılmıştır.

Şekil 1'de gösterilen doğrusal viskoelastik malzemelerin sürekli bir sinüzoidal yükleme altındaki gerilme, şekil değiştirme genlikleriyle bağlantılanan ve tekerlek izi ve yorulma çatlaklarının tahmin edilmesini sağlayan kompleks modülün (Eşitlik-1) mutlak değeri genellikle $|E^*|$ olarak ifade edilir. BSK rijitliğinin zaman ve sıcaklıkla ilişkili detaylı olarak hesaplanması olarak da tanımlanan $|E^*|$ 'nin artması, asfalt betonu tabakasının trafik yüklemeleri altında deformasyonlara ve yüksek sıcaklıklarda teker izine karşı direncini ve düşük ısı çatlaklarına hassasiyetini artıracaktır [18].



Şekil 1. Dinamik kompleks modülü testi bileşenleri [18].

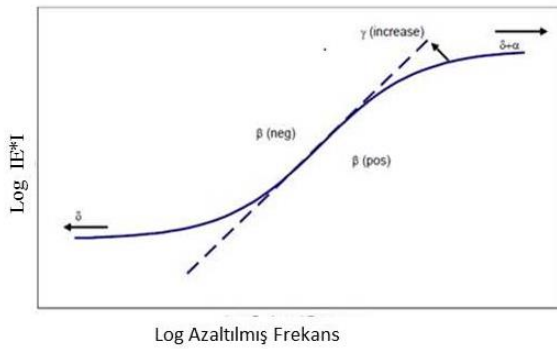
$$E^* = \frac{\sigma_o \sin(\omega t)}{\epsilon_o \sin(\omega t - \varphi)} \quad (1)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{t_{lag}}{t_p} \cdot (360^\circ) = t_{lag} \cdot f \cdot (360^\circ) \quad (3)$$

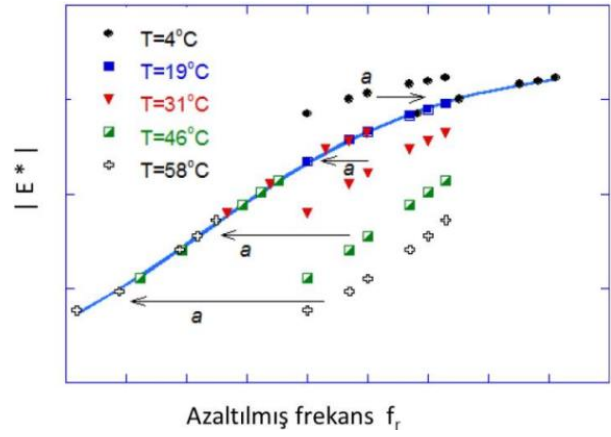
Burada, E^* kompleks modül, σ_o tepe gerilme, ϵ_o tepe birim şekil değişirme, t zaman, ω açısal hız, φ tepe gerilme ile tepe birim şekil deformasyon arasındaki zaman farkı (Faz açısı), t_p tekrarlı gerilmenin yüklenme periyodu, t_{lag} gerilme şekil değişirme arasındaki zaman farkıdır.

Maryland Üniversitesi Asfalt Enstitüsün'de yapılan araştırmalarda karışımların sıcaklık ve yüklenme frekansına göre $|E^*|$ değişiminin (Eşitlik-4)'te gösterilen sigmimodal matematiksel fonksiyonla çizilen master (ana) eğrisiyle (Şekil-2) temsil edileceği gösterilmiştir [19].



Şekil 2. Sigmimodal fonksiyon eğrisi [19]

Farklı sıcaklık ve yüklenme frekansında $|E^*|$ değeri farklı değerlere sahiptir. Frekansın artmasıyla, sıcaklığın artmasıyla azalır. Frekans ve sıcaklığın $|E^*|$ üzerindeki etkilerini birleştirebilmek için bitümün viskozitesi ve sıcaklık arasındaki ilişkiye dayalı olarak bağlayıcı test verileri kullanılır. Belirlenen sıcaklık veya frekans referans alınarak, düzeltilmiş frekans, sıcaklık değişimlerine göre frekans-sıcaklık süper pozisyonu ilkesi kullanılarak çizilen karışımların master (ana) eğrisi (Şekil-3), geniş bir sıcaklık ve frekans aralığında $|E^*|$ hesaplamak için kullanılır [20].

Şekil 3. Asfalt karışımının farklı sıcaklıklarda $|E^*|$ ana eğrisi [20]

$$\text{Log}|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \text{Log}(f_r)}} \quad (4)$$

$|E^*|$ dinamik modül, δ minimum modül değeri t_r referans sıcaklığında yüklenme süresi, $\delta + \alpha$ maksimum modül değeri, β, γ sigmodal fonksiyonun şeklini tanımlayan parametrelerdir.

AASHTO M-A Tasarım Rehberinde birinci seviye projeler için, yaşlanmayı da dikkate alan bağlayıcı ve dinamik rijitlik modülü deneylerinden karışımların farklı frekans (25, 10, 5, 1.0, 0.5, , 0.1 Hz) ve sıcaklıklarda (-10, 4.4, 21.1, 37.8, , 54.4°C) deney sonuçlarına göre sıcaklık ve frekansla ilişkili olarak karışımın frekans ve sıcaklık süper pozisyonu ilkesine göre referans sıcaklığı baz alınarak tek bir düz fonksiyonda birleşene kadar değişim yapılarak (Eşitlik 5-6) tespit edilen master (ana) eğrisinden frekansa bağlı $|E^*|$ değerleri hesaplanmaktadır [21].

$$\text{Log}(t_r) = \text{Log}(t) + \text{Log}(a_T) \quad (5)$$

$$\text{Log}(f_r) = \text{Log}(f) + \text{Log}(a_f) \quad (6)$$

a_T sıcaklığın bir fonksiyonu olarak düzeltme faktörü, t yüklenme süresi, f yüklenme frekansı, f_r referans sıcaklığında azaltılmış yüklenme frekansıdır.

Bitümlü sıcak karışım üst yapıların M-A yöntemle tasarımında $|E^*|$ tahmini farklı kombinasyonlarda modellerle yapılmaktadır. AASHTO M-A tasarımında ikinci ve üçüncü hiyerarşik seviye projeler için $|E^*|$ tahmininde uygulanmasına izin verilen, modifiye ve modifiye edilmemiş bağlayıcı numunelere yapılan test sonuçlarına göre elde edilen 1999 Witczak Modeli (7) agrega gradasyonu, geleneksel sıcak karışım ve asfalt bağlayıcı davranışı, bağlayıcı-agrega etkileşimi ve yüklenme durumunu karakterize eden sekiz girdi parametresinden, bir dizi sıcaklık, yüklenme hızı ve yaşlanma koşullarıyla karışımların dinamik rijitlik modülü tahmin edilmektedir [22,23].

$$\begin{aligned} \log|E^*| &= -3,750063 + 0,02932 \cdot \rho_{200} - 0,001767 \cdot (\rho_{200})^2 + 0,002841 \cdot \rho_4 - 0,058097 \cdot V_h \\ &- 0,802208 \left[\frac{V_{beff}}{V_h + V_{beff}} \right] \\ &+ \frac{3,87197 - 0,0021 \cdot \rho_4 + 0,003959 \cdot \rho_{38} - 0,000017 \cdot (\rho_{38})^2 + 0,00547 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,313351 \cdot \log(f) - 0,393532 \cdot \log(\eta))}} \end{aligned} \quad (7)$$

Bitümün viskozitesiyle sıcaklık ilişkisi logaritmik olarak Eşitlik 8’de gösterilmiştir [15].

$$\log \log(\eta) = A + VTS \cdot \log(T_R) \quad (8)$$

η bitümün viskozitesi (10^6 Poise), f yükleme frekansı, V_h hava boşluğu(%), V_{beff} hacimsel olarak efektif bitüm (%) , ρ_4 , ρ_{38} , ρ_{35} No 4, 3/8”, 3/4” elekler üzerinde kalan (%), ρ_{200} No 200 elekten geçen (%), T_R Sıcaklık (Rankine), A , VTS regresyon parametreleridir.

1999 Witczak Modeli eşitliğinde dikkate alınmayan bitümün yükleme frekansıyla viskozite değişimi, [19] 2006 Witczak Modeli (Eşitlik-10) yardımıyla dinamik kayma reometresi deneyinden elde edilen kompleks kayma modülü (G_b^*) ve faz açısı (δ_B) dikkate alınarak daha gerçekçi bir yaklaşım sağlanmaya çalışılmıştır.

$$\begin{aligned} \log|E^*| &= -0,349 + 0,754 \cdot (|G_b^*|^{-0,0052}) \cdot \left(6,65 - 0,032 \cdot \rho_{200} + 0,0027 \cdot \rho_{200}^2 + 0,011 \cdot \rho_4 \right. \\ &- 0,0001 \cdot \rho_4^2 + 0,006 \cdot \rho_{38} - 0,00014 \cdot \rho_{38}^2 - 0,08 \cdot V_h \\ &- 1,06 \cdot \left(\frac{V_{beff}}{V_h + V_{beff}} \right) \\ &+ \frac{2,558 + 0,032 \cdot V_h + 0,713 \cdot \left(\frac{V_{beff}}{V_h + V_{beff}} \right) + 0,0124 \cdot \rho_{38} + 0,0001 \cdot \rho_{38}^2 + 0,0098 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{(-0,7814 - 0,5785 \cdot |G_b^*| + 0,8834 \cdot \log(\delta_B))}} \end{aligned} \quad (9)$$

Witczak Modelleriyle (1999;2006) hasar görmemiş numunelerin bitümün referans(η_r) ve istenilen(η) sıcaklıklarda viskozitesiyle ilişkili düzeltme faktörü a_T (Eşitlik-10) uyarlama parametresi (c) ile hesaplanarak karışımların ana eğrisi çizilmektedir [24].

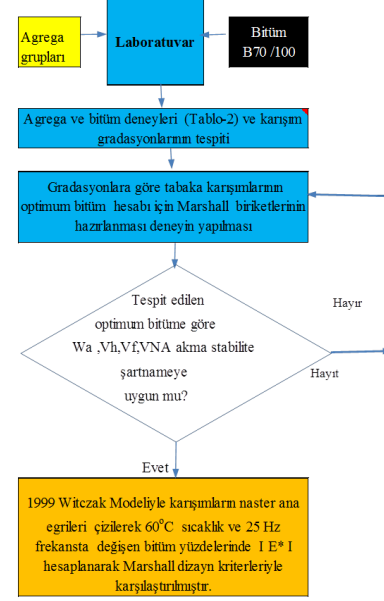
$$\log(a_T) = c (\log(\eta) + \log(\eta_r)) \quad (10)$$

Materyal ve Metod

Doğubayazıt-Iğdır güzergâhında özel işletmeye ait kalker taş ocağı malzemesinden konkasörde kırılarak üretilmiş olan dört grup (1 1/2”- 3/4”, 1”-3/4”, 3/4”-1/2”, 1/2”-No 4 ve No4-altı) agreganın, Batman rafinerinden temin edilen B/70/100 sınıfı bitümün mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve Marshall dizaynı için gerekli olan deneyler Karayolları 12 Bölge Müdürlüğü kontrollük laboratuvarında yapılmıştır.

Bu çalışmada temin edilen malzemelerden bitümlü temel, binder, aşınma tabakalarının her biri için (dizayn) Marshall dizaynıyla optimum bitümü tespit edilmiştir. Optimum bitümde farklı frekans (25, 10, 5, 1, 0,5, 0,1Hz) ve sıcaklıklarda (-10, 0, 4.4, 21.11, 37.8, 54.4 °C) Witczak 1999 (Eşitlik-7) modeliyle $|E^*|$ değişimi, 21.1 °C referans sıcaklığında karışımların master (ana) eğrileri çizilmiştir. Marshall dizaynının bitüm

yüzdelelerinde 25 Hz frekansta 59.4 °C sıcaklıkta hesaplanan $|E^*|$ ile Marshall verilerinin ilişkisi incelendiği bu çalışmanın akış şeması çizilmiştir (Şekil-1).



Şekil 4. Çalışmanın akış şeması

Bitümlü temel, binder, aşınma tabakası karışımı agregalarına ve bitüme yapılan deney sonuçları Tablo 1’de gösterilmiştir.

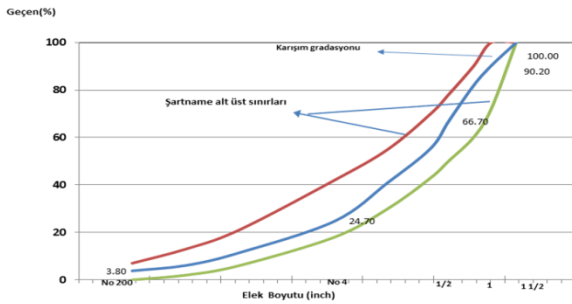
Dört grup malzemeden, Karayolları Teknik Şartnamesine [25] göre bitümlü temel karışımı Tip –A, aşınma karışımı Tip-1, binder karışımı ise şartnamede belirtilen tek gradasyonu limitleri içerisinde bulunacak şekilde hazırlanan karışım gradasyonlarının (Tablo-2) elek analizi grafikleri çizilmiştir.(Şekil-5)

Tablo 1 Agregave bitümün fiziksel ve mekanik özellikleri

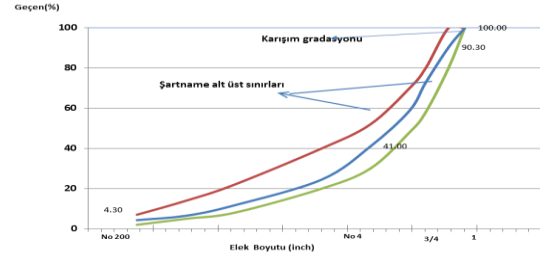
Agrega Deneyleri		Karş. Malz Grup.			Deney Standartı
Deney Adı	Karışım	Kaba	İnce	Filler	
Hacim özgül Ağırlığı	B.Temel	2.669	2.672	-	TSE1997-7
	Binder	2.668	2.670		
	Aşınma	2.678	2.670		
Zahiri Özgül Ağırlığı	B.Temel	2.704	2.711	2.715	TSE1997-7
	Binder	2.701	2.710	2.715	
	Aşınma	2.701	2.710	2.716	
Su Absorbsiyon %	B.Temel	0.49	0.53	-	TSE1997-6
	Binder	0.47	0.56		
	Aşınma	0.44	0.56		
MgSO ₄ Donma kaybı %	B.Temel		1.5		TS EN 1367-2
	Binder		1.5		
	Aşınma		1.5		
Los Angeles Aşınma kaybı %	B.Temel		21		TS EN 1097-2
	Binder		21		
	Aşınma		21		
Yassılık indeksi	B.Temel		20		BS 812
	Binder		20		
	Aşınma		20		
Bitüm Deneyleri					
Deney Adı	Deney Sonucu			Deney Standartı	
Bitüm özgül ağırlığı	1.043			TS EN 15326	
Bitüm penetrasyonu	77			TS EN 1426	
Yumuşama noktası	50.8			TS EN 1427	

Tablo 2 Karışım gradasyonları

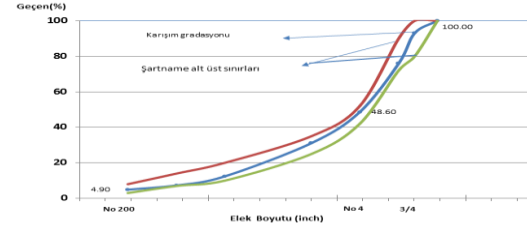
Elek Açıklığı (İnch)	Bitümlü Temel		Binder		Aşınma	
	Düzeltilmiş Diz. Grad.	Şart. Grad.	Düzeltilmiş Diz. Grad.	Şart. Grad.	Düzeltilmiş Diz. Grad.	Şart. Grad.
1 1/2"	100,00	100	100,00	100	100,00	100
1"	90,20	72-100	100,00	100	100,00	100
3/4"	81,80	60-90	90,30	80-100	100,00	100
1/2"	66,70	50-78	72,80	58-80	93,10	88-100
3/8"	55,40	43-70	58,80	48-70	75,90	72-90
No.4	41,00	30-55	41,00	30-52	48,60	42-52
No.10	24,70	18-42	24,50	20-40	31,10	25-35
No.40	11,40	6-21	11,70	8-22	12,40	10-20
No.80	6,10	2-13	6,50	5-14	7,30	7-14
No.200	3,80	0-7	4,30	2-7	4,90	3-8



a) Bitümlü temel



b) Binder



c) Aşınma

Şekil 5. Karışımların elek analizi grafikleri

Marshall dizaynı için tabakaların belirlenen agrega gradasyonlarında hazırlanan toplam 45 adet Marshall numunesinin sonuçları ve dizayn değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Karışımlar için optimum bitüm içeriği şartnamede belirtilen boşluk yüzdeleri aralığı içerisinde kalacak şekilde karışımın diğer özelliklerinin şartnameye uygunluğu kontrol edilerek tespit edilmiştir.

Tablo 3 Tabaka karışımlarının Marshall deney sonuçları

a) Bitümlü temel

Grup No	Bitüm W _a (%)	Hac. Özg. Ağ D _p	Mak. Teo. Özg. Ağ. D _t	Boş. V _h (%)	Ağ. Arası Boş. VMA (%)	Asf. Dol Boşluk V _f (%)	Akma (mm)	Düzeltilmiş Stab. (Kg)
1	3	2,374	2,572	7,71	13,75	43,94	2,67	1750
2	3,5	2,405	2,554	5,82	13,03	55,34	2,83	1834
3	4	2,421	2,536	4,54	12,88	64,77	2,90	1742
4	4,5	2,419	2,519	3,96	13,36	70,40	3,50	1722
5	5,00	2,419	2,502	3,51	13,96	74,86	3,86	1733
Diz.	3,80	2,42	2,54	5,00	12,90	61,20	3,00	1775
Şartn.	3,50--5,50	--	--	4--6	12-14,50	55-75	2--5	Min 600

b) Binder

Grup No	Bitüm W _a (%)	Hac. Özg. Ağ D _p	Mak. Teo. Özg. Ağ. D _t	Boş. V _h (%)	Ağ. Arası Boşluk VMA (%)	Asf. Dol Boş V _f (%)	Akma (mm)	Düzeltilmiş Stab. (Kg)
1	3,5	2,380	2,553	6,78	13,91	51,26	2,79	1367
2	4	2,404	2,535	5,15	13,43	61,65	2,84	1431
3	4,5	2,417	2,518	4,01	13,41	70,08	2,48	1445
4	5	2,424	2,501	3,05	13,54	77,46	2,60	1389
5	5,5	2,417	2,484	2,71	14,22	80,92	3,28	1342
Diz.	4,25	2,412	2,526	4,50	13,4	66,1	3,03	1430
Şartn.	3,5- 6,5	--	--	4-6	13-15	60-75	2-4	Min 750

c) Aşınma

Grup No	Bitüm W _a (%)	Hacim Özg. Ağ D _p	Mak. Teo. Özg. Ağ. D _t	Boş. V _h (%)	Ağ. Arası Boş VMA (%)	Asf. Dol Boş V _f (%)	Akma (mm)	Düzeltilmiş Stabilitite (Kg)
1	4,00	2,375	2,536	6,36	14,52	56,17	2,55	1368
2	4,50	2,395	2,519	4,93	14,21	65,31	2,77	1486
3	5,00	2,410	2,502	3,68	14,08	73,88	3,03	1548
4	5,50	2,420	2,486	2,64	14,14	81,32	3,17	1439
5	6,00	2,415	2,469	2,21	14,72	85,01	3,26	1420
Dizayn	4,90	2,405	2,505	4	14,2	71,5	2,9	1530
Şartname	4-7	--	--	3-5	14-16	60-75	2-4	Min. 900

Witczak Modellerinde karışımın hacimsel efektif bitüm yüzdesi karışımın bitüm oran, agregaların bitüm

absorpsiyonu, bitümün özgül ağırlığı ve numunelerin (Biriketlerin) hacimsel özgül ağırlığıyla ilişkilidir. Karışımların farklı bitüm oranları için efektif bitüm

yüzdeleri (V_{beff}) hacimsel olarak hesaplanarak Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4. Karışımların hacimsel olarak efektif bitümleri

a) Bitümlü Temel

W_a (%)	P_{abs} (%)	P_{beff} (%)	D_p	G_{bit}	V_{beff} (%)
3.00	0.28	2.72	2.37372	1.039	6.05
3.50	0.28	3.22	2.405118	1.039	7.22
4.00	0.28	3.72	2.420856	1.039	8.36
4.50	0.28	4.22	2.418922	1.039	9.43
5.00	0.28	4.72	2.418922	1.039	10.49
Dzy-3.80	0.28	3.52	2.416	1.039	7.91
W_a : Bitüm miktarı, P_{abs} : Bitüm absorpsiyonu P_{EFAst} : Efektif bitüm D_p : Biriketlerin hacimsel özgül ağırlıkları G_{bit} : Bitüm özgül ağırlığı					

b) Binder

W_a (%)	P_{abs} (%)	P_{EFAst} (%)	D_p	G_{bit}	V_{beff} (%)
3.50	0.28	3.22	2.380	1.039	7.15
4.00	0.28	3.72	2.404	1.039	8.30
4.50	0.28	4.22	2.417	1.039	9.42
5.00	0.28	4.72	2.424	1.039	10.52
5.50	0.28	5.22	2.417	1.039	11.54
Dzy 4.25	0.28	3.97	2.412	1.039	8.86
W_a : Bitüm miktarı, P_{abs} : Bitüm absorpsiyonu P_{EFAst} : Efektif bitüm D_p : Biriketlerin hacimsel özgül ağırlıkları G_{bit} : Bitüm özgül ağırlığı					

c) Aşınma

W_a (%)	P_{abs} (%)	P_{EFAst} (%)	D_p	G_{bit}	V_{beff} (%)
4.00	0.28	3.72	2.375	1.041	8.18
4.50	0.28	4.22	2.395	1.041	9.32
5.00	0.28	4.72	2.410	1.041	10.44
5.50	0.28	5.22	2.420	1.041	11.53
6.00	0.28	5.72	2.415	1.041	12.55
Dzy 4.90	0.28	4.62	2.405	1.041	10.20
W_a : Bitüm miktarı P_{abs} : Bitüm absorpsiyonu P_{EFAst} : Efektif bitüm D_p : Biriketlerin hacimsel özgül ağırlıkları G_{bit} : bitüm özgül ağırlığı					

Tablo 5. Farklı sıcaklıklarda bitüm vizkositesi

T (°C)	η (Poise 10 ⁶)
-10	68238,23
0	1943,84
4,4	484,01
21,1	5,48688
37,8	0,16897
54,4	0,01106

performans ait A ve VTS parametrelerine (A=10.312. VTS=-3.440) göre [19] bitümün vizkositesi Eşitlik-8'den hesaplanmıştır (Tablo-5). Optimum bitümlü karışımların AASHTO M-A Tasarım Rehberinde birinci seviye projeler için belirtilen frekans ve sıcaklıklarda $|E^*|$ 1999 Witczak Modeliyle hesaplanmıştır. (Tablo-6)

Farklı sıcaklıklarda $|E^*|$ tahmini için B 707100 bitümün performans sınıfı PG 64-28 kabul edilerek [26], bu

Tablo 6. Karışımların optimum bitümde $|E^*|$

a) Bitümlü temel

f (Hz)	Sıcaklık °C					
	-10	0	4,4	21,11	37,8	54,4
	E (psi)					
25	4753676	3346986	2757725	1105581	385112	141489
10	4487532	3037534	2453011	908685	298113	106590
5	4277104	2803637	2227975	776314	244026	85875
1	3763265	2271859	1734290	523075	150665	51972
0,5	3533700	2052078	1537995	436035	121733	41952
0,1	2991453	1575791	1129619	278778	73727	25809

b) Binder

f (Hz)	Sıcaklık °C					
	-10	0	4,4	21,11	37,8	54,4
	E (psi)					
25	4176886	2955133	2441367	991159	350309	130491
10	3946167	2685498	2175116	816846	272131	98689
5	3763615	2481447	1978195	699369	223373	79747
1	3317311	2016617	1545182	473801	138833	48598
0,5	3117654	1824084	1372562	395952	112504	39345
0,1	2645315	1405822	1012409	254716	68610	24368

c) Aşınma

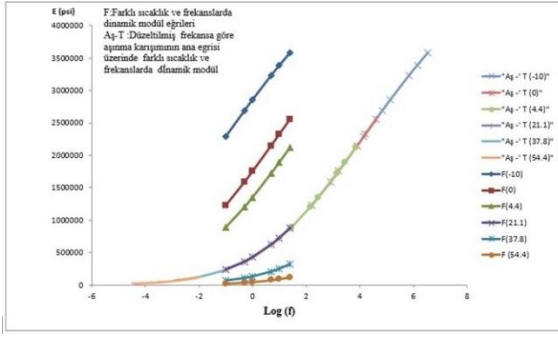
f (Hz)	Sıcaklık °C					
	-10	0	4,4	21,11	37,8	54,4
	E (psi)					
25	3577626	2550326	2115729	876003	316710	120729
10	3384198	2322466	1889743	724993	247388	91866
5	3230978	2149700	1722218	622831	203940	74579
1	2855685	1754932	1352502	425547	128076	45942
0,5	2687445	1590859	1204514	357020	104263	37365
0,1	2288467	1233058	894371	231891	64274	23383

Düzeltilme faktörü a_T 21.1°C referans sıcaklığında $c = 1.255882$ alınarak [19,27] Eşitlik 10 ile hesaplanış,

düzeltilmiş frekanslarla (Tablo-7) çizilen aşınma tabakasının $|E^*|$ ana eğrisi Şekil 6'da gösterilmiştir.

Tablo 7. Referans sıcaklığında düzeltilmiş frekanslar

f (Hz)	Sıcaklık °C					
	-10	0	4,4	21,11	37,8	54,4
	Düzeltilmiş Frekans LOG(fr)					
25	6,540403	4,599605	3,841299	1,39794	-0,5	-1,98737
10	6,142463	4,201665	3,443359	1	-0,898	-2,38531
5	5,841433	3,900635	3,142329	0,69897	-1,199	-2,68634
1	5,142463	3,201665	2,443359	0	-1,898	-3,38531
0,5	4,841433	2,900635	2,142329	-0,30103	-2,199	-3,68634
0,1	4,142463	2,201665	1,443359	-1	-2,898	-4,38531



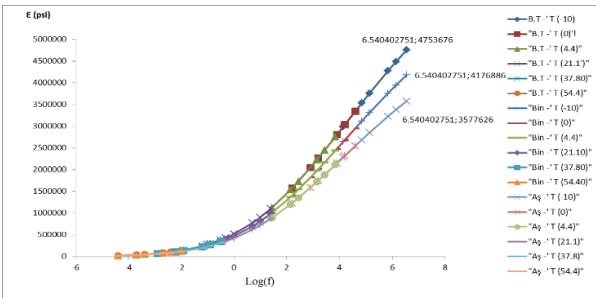
Şekil 6. Aşınma tabakası dinamik modül ana eğrisi

Aynı şekilde bitümlü temel, binder tabakalarının yıllık ortalama 21.11 °C referans sıcaklığında düzeltilmiş

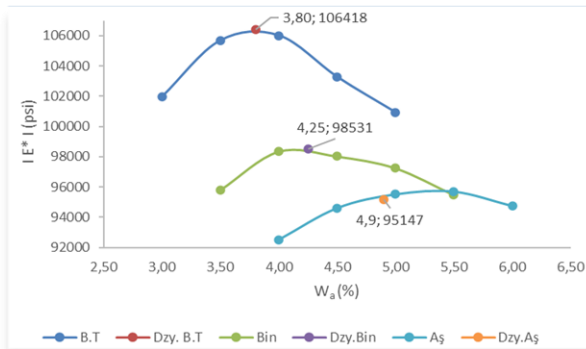
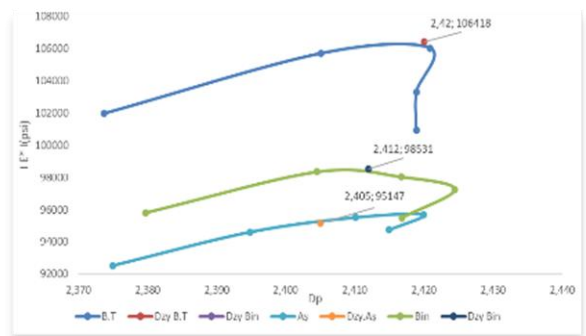
Tablo 8 Değişen bitüm yüzdelinde 59,60 °C 'de $|E^*|$

Bitümlü Temel		Binder		Aşınma	
W_a (%)	E (psi)	W_a (%)	E (psi)	W_a (%)	E (psi)
3,00	101946				
3,50	105681	3,50	95799		
4,00	106017	4,00	98350	4,00	92514
4,50	103274	4,50	98032	4,50	94607
5,00	100928	5,00	97256	5,00	95518
5,50		5,50	95483	5,50	95695
6,00				6,00	94739
Dzy 3.80	106418	Dzy 4.25	98531	Dzy 4.90	95147

frekanslarla $|E^*|$ ana eğrileri çizilmiştir (Şekil-7). Eğrilerden 1 Hz 'den büyük frekanslarda tabakaların $|E^*|$ arasında farkın arttığı tespit edilmiştir.

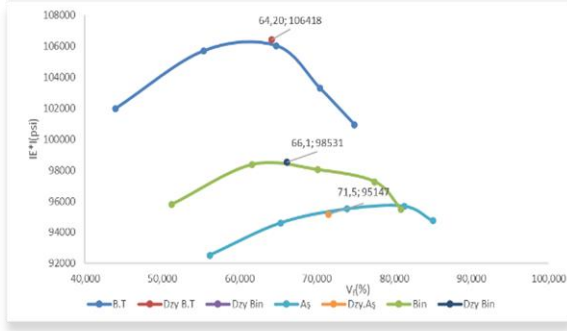


Şekil 7. Tabaka karışımlarının 21.1 °C referans sıcaklığında ana eğrileri

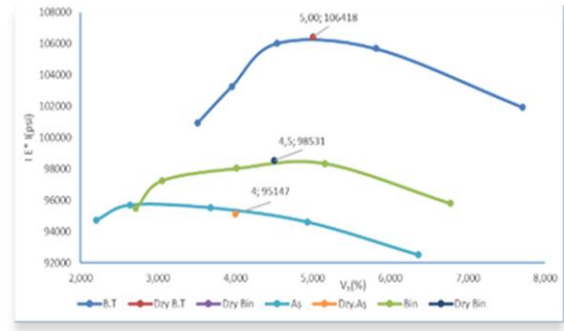
a) $|E^*| - W_a$ b) $|E^*| - D_p$

Hacimsel hesaplamalara dayalı olarak yapılan Marshall dizaynı ülkemizde yeni yapılacak BSK kaplamalar ve mevcut kaplamaların onarım çalışmalarında yaygın olarak uygulanmaktadır. Karışımların en temel özelliklerinden biri olan $|E^*|$ değerlerinin Marshall dizayn sonuçlarıyla ilişkisinin araştırılması için 60 °C su da 40 dakika bekletilen [28] numuneler akma ve stabilite deneyine tabii tutulmadan önce yüzey sıcaklıkları lazer okuyucuyla ortalama olarak 59.4 °C olarak okunmuştur. Bu sıcaklık ve 25 Hz frekansta değişen bitüm yüzdelere (Marshall dizaynı) göre $|E^*|$ değerleri hesaplanmıştır (Tablo-8).

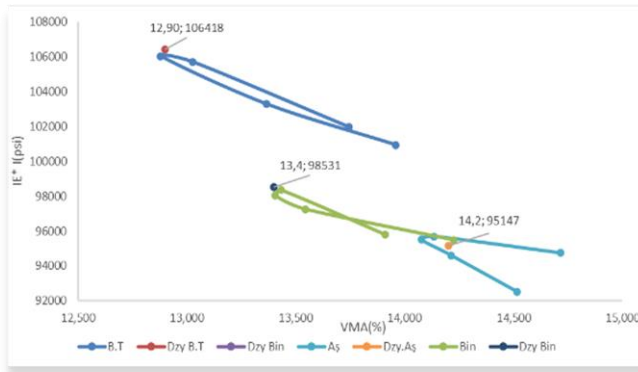
Her tabaka karışımının değişen bitüm yüzdelere göre Tablo 3 'de gösterilen hacim özgül ağırlık (D_p), boşluk (V_h), asfaltla dolu boşluk (V_f), agregalar arası boşluk (VMA) ,akma, stabilite değerleriyle 59,4 °C'de hesaplanan $|E^*|$ ilişkisi Şekil 8'de çizilen grafiklerle gösterilmiştir. Bitümlü temel ve binder karışımlarında optimum bitümden $|E^*|$ maksimum olmasına karşın, aşınma karışımında şartnamede belirtilen V_f üst sınırına yaklaşılmışından dolayı bitüm miktarı azaltılmış bu nedenle maksimum $|E^*|$ yaklaşık % 0.5 daha az tespit edilmiştir.



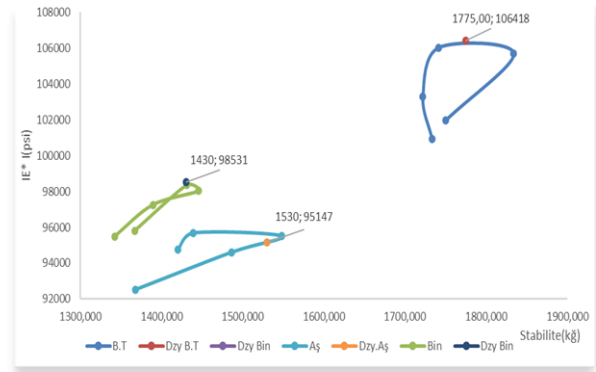
c) $|E^*| - V_f$



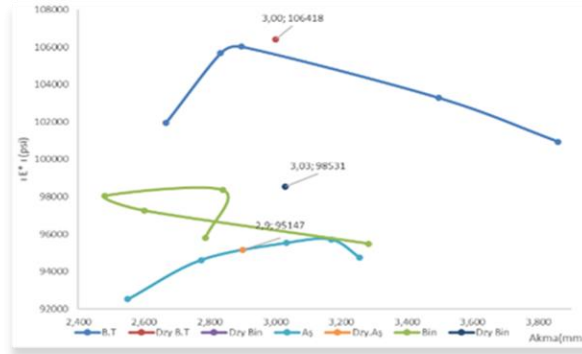
c) $|E^*| - V_h$



d) $|E^*| - VMA$



e) $|E^*| - Stabilité$



f) $|E^*| - Akma$

Şekil 8. $|E^*|$ ile stabilite, akma, W_a , VMA, D_p , V_h , V_f ilişkisi

Karışımların belirlenmiş agrega gradasyonlarıyla Marshall dizaynı verilerinin tahmini $|E^*|$ değerleriyle karşılaştırıldığında optimum bitüm ve buna bağlı dizaynın VMA, D_p , V_h , V_f stabilite değerlerinde tahmin edilen $|E^*|$ yakın değerler elde edildiği gözlenmiştir.

Sonuç ve tartışma

Geleneksel BSK tabakalarının M-A tasarımına göre tahmin edilen $|E^*|$ ile Marshall dizayn verilerinin değerlendirilmesinden

- Karışımların optimum bitümde dinamik modülleri maksimum olduğu ve % 1 bitüm oranı değişiminin karışımın dinamik rijitlik modülünü ortalama \mp % 5 değiştirdiği

- Bitümü optimum olmayan karışımların dinamik modülünün azaldığı
- Karışımların değişen bitüm yüzdelinde, hacim özgül ağırlık boşluk asfaltla dolu boşluk agregalar arası boşluk, stabilite ile dinamik modül değişimi grafiklerinin birbirlerine benzer olduğu, optimum bitümlü bu verilere ait değerlerde dinamik modülün maksimum olduğu
- Belirlenen sıcaklık ve frekans aralığında sıcaklık değişiminin frekansa göre dinamik modülü daha fazla etkilediği,
- Şartname sınırları içerisinde kalan agrega gradasyonlarına göre, bitümlü temel tabakalarının, tahmini dinamik modülünün binder tabakasından ortalama %10, aşınma tabakasından %20 büyük olmasına $\frac{3}{4}$ ’ elek üzerinde kalan malzemenin nedenlerden biri olduğundan, iklim, çevre ve trafik yükü koşullarına en fazla maruz kalan aşınma tabakasının maksimum dane boyutunun artırılarak gradasyon sınırlarının yeniden belirlenmesi üst yapı performansını artırtacağı
- Referans sıcaklığında karışımların master(ana) eğrisinde 1 Hz’den yüksek frekanslarda tabakaların dinamik modülleri arasında fark büyüdüğünden tasarımcıların taşıt sayısı, dingil tipi ve hızla ilişkili olan yükleme süresi değişimleri dikkate alınarak proje içerisinde üstyapı tabaka kalınlıklarında değişimlerle ekonomik değerlendirmeler, yapılabileceği tespit edilmiştir.

Marshall dizaynının optimum bitümle tahmin edilen dinamik rijitlik modüllerine optimum bitümden daha az bitümlede yaklaşıldığından, tasarımcılar tarafından iklim, çevre ve trafik yükü koşullarından daha az etkilenen binder ve bitümlü temel tabakalarında daha az bitüm kullanılması durumunda, gerilme analizlerinin yapılarak üst yapı yaşam döngüsünün ve şartname sınırlarının araştırılması gerekmektedir.

Kaynaklar

- [1] Ceylan, H. Gopalakrishnan, K. Kim, S. “Hot Mix Asphalt Dynamic Modulus Prediction Models Using Networks Approach” ANNs in Engineering Conference Missouri.10-14.2007
- [2] Hou.H , Wang.T, Wu.S ,Xue.S ,Tan.R , Chen.J , Zhou.M “Investigation On The Pavement Performance Of Asphalt Mixture Based On Predicted Dynamic Modulus” Construction and Building Materials.11-17,2016
- [3] Alataş, T. İstek, A. “Farklı Katkılarla Hazırlanan Asfalt Karışımların Sünme Performanslarının İncelenmesi” DÜMF Mühendislik Dergisi .745-758,2020
- [4] Stephen.A, Cross. P, Determination of Dynamic Modulus Master Curves for Oklahoma HMA Mixtures” Final Report Oklahoma State University,1-5,2007

- [5] Georgoul.K, Loizos.A, Plati.C “Calibration Of Dynamic Modulus Predictive Model” Construction and Building Materials ,66-68,2016
- [6] S.Avcı,“Esnek Üstyapı Tasarım Yöntemlerinin AASHTO 2002 İle AASHTO 1993 Yöntemlerinin Karşılaştırılması “İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi 10-23,2006
- [7] AASHTO, Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide , 10-27, 2008
- [8] Clyne .T , Li.X., Marasteanu.O.,Skok.E” Dynamic And Resilient Modulus Of Mn/Dot Asphalt Mixtures” Final Report University of Minnesota Department of Civil Engineering ,2-5,2003
- [9] Igw.A “Comparative Study of Asphalt Institute – Witczak 1-40D Dynamic Moduli for Polythene Bag Modified HMConcrete Using Predictive Models” - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology,47-50,2016.
- [10]Zhang, D. Birgisson. B, Luo, X “A new dynamic modulus predictive model for asphalt mixtures based onthe law of mixtures “Construction and Building Materials 1-20 (2020)
- [11]Nobakht, M. Sakhaefar,S.M. “Dynamic modulus and phase angle prediction of laboratory aged asphalt mixtures” Construction and Building Materials. 2-12, 2018
- [12]Hossain, H. Zaman, M. “Prediction of Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalts withReclaimed Asphalt Pavement “Advances in Civil Engineering , 4-13,2020
- [13]Mateosa.A, Soares.J” Validation Of A Dynamic Modulus Predictive Equation On The Basis Of Spanish Asphalt Concrete Mixtures” Materiales de Construcción,1-5,2015
- [14]KGM,“ Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi”, Teknik Araştırmalar Dairesi Üst Yapı Şubesi Müdürlüğü, 5-99,2008
- [15]Güzel, İ. Benli, A “Bazalt Agregalı Bitümlü Sıcak Karışım Tabakalarının Dinamik Rijitlik Modülünün Hesaplanması ve Marshall Tasarım Kriterleriyle ” DÜMF Mühendislik Dergisi.1374-1385,2020
- [16]Nemati.R, Dave.E ” Nominal Property Based Predictive Models For Asphalt Mixture Complex Modulus (Dynamic Modulus And Phase Angle)” Construction and Building Materials,308-319,2018
- [17]M Y.Huang “Pavement Analysis and Design” Second Edition ,307,2006

- [18] Xiao.Y “Evaluation Of Engineering Properties Of Hot Mix Asphalt Concrete For The Mechanistic-Empirical Pavement Design” Doctor thesis Department of Civil & Environmental Engineering Florida State University ,41-43,2009
- [19] Garcia.G, Thompson.M ” HMA Dynamic Modulus Predictive Models– A Review” Research Report FHWA-ICT-07-005 ,8-20,2007
- [20] Jamrah.A “Linear Viscoelastic Characteristics of Michigan Asphalt Mixtures and the Effect Of Sample Size on Material Properties” Master Thesis Civil Engineering Michigan State University,8-17,2013
- [21] Kim.Y Im.S, Ban.H” Layer Moduli of Nebraska Pavements for the New Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)” Report Research, University of Nebraska–Lincoln Nebraska Department of Roads,36-45,2010
- [22] Yu.H, Shen.S “An Investigation of Dynamic Modulus and Flow Number Properties of Asphalt Mixtures in Washington State” Final Report ,Department of Civil and Environmental Engineering Washington State University,10-14,(2012)
- [23] Yu.J” Modification of Dynamic Modulus Predictive Models for Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Shingles ”Master Thesis Civil Engineering Iowa State University,15-22,2012
- [24] Kavussi.A , Solatifar.N, Abbasghorbani. M “Mechanistic-Empirical Analysis of Asphalt Dynamic Modulus for Rehabilitation Projects in Iran” Journal of Rehabilitation in Civil Engineering , 18-29,2016
- [25] Karayolları Teknik Şartnamesi ,Karayolları Genel Müdürlüğü,407-443,2013
- [26] Güngör. A, Sağlık. A, Orhan. F, Arıkan Öztürk. E” Polimer Modifiye Bitümlerin Superpave Performans Sınıflarının Belirlenmesi” 5. Ulusal Asfalt Sımpozyumu 2-8,2009
- [27] Solatifar .N, Kavussi.A, Abbasghorbani.M, Katicha.S ”Development Of Dynamic Modulus Master Curves Of İn-Ser Karayolları teknik Şartnamesi (2013). 407-410.vice Asphalt Layers Using MEPDG Models” Road Materials and Pavement Design, 225-243,2019
- [28] Gültekin.M, Nayır.N, Ziya.U, Çalışkan.K, Öztürk.A, Tutan.N, Komut.M “ Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı “ Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, 2021,59-41,2021



A computer program for linear analysis of two-dimensional semi-rigid frames

Senem YILMAZ ÇETİN ^{1*}, Halil GÖRGÜN ², Derman KAYA ³

1 Dicle University ,Department of Civil Engineering, senyilmaz@dicle.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-7282-6413

2 Dicle University ,Department of Civil Engineering, hgorgun@dicle.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-4357-0009

3 Dicle University ,Department of Civil Engineering,17806503@org.dicle.edu.tr , Orcid No: 0000-0002-5779-736X

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 March 2022
Received in revised form 18 April 2022
Accepted 4 June 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Stiffness matrix, semi-rigid
connections, computer program

Doi: 10.24012/dumf.1087793

* Corresponding author

ABSTRACT

It is usual to assume that a displacement caused at any point in a structure is linearly dependent on the magnitude of the loads applied. This paper focuses on the linear analysis of 2-D frames with flexural connected beam-column members considering shear displacements. A computer program was written in MATLAB for this purpose. To achieve the above purpose, first, the element stiffness matrix with linear flexural springs at its ends has been obtained by using relevant differential equations, considering shear deformations. In the analysis of the stiffness methods, it has been observed that the loading vector can be obtained by means of the loads applied between the joint points. It is found that the presents of an axial load in a member affect the values of the fixed-end forces, and these are the subject of another paper. For linear cases, the semi-rigid end forces have been obtained for a uniformly distributed load, an unsymmetrical point load, a linearly distributed load, an unsymmetrical trapezoidal distributed load, and an unsymmetrical triangular distributed load. To prove the validity of the computer program, some problems in the literature have been solved differently. There was a good agreement between the relevant results.

Introduction

Both clockwise and anti-clockwise bending moments M affects the connections in precast concrete frames as shown in Figure 1 that induces relative rotations Φ , between the beam end and the face of the adjacent column. In this type of semi-rigid connection, rotational stiffness and finite strength are substituted for rigid connections to perform frame analysis. Strength, stiffness, and ductility (deformation capacities) are important properties of connections. The idealized behaviour shown in Figure 2 may be described by moment-rotation $M-\Phi$ curve. In Figure 2, the rotational stiffness of the joint J , is shown by the gradient of the $M-\Phi$ curve. Expressing stiffness K_s as a non-dimensional term, where

$$K_s = \frac{J}{4 E_c I / l} \tag{1}$$

is the ratio of the stiffness of the connection to the flexural stiffness of the beam that it is connected, while E_c is the modulus of elasticity of concrete, l is the effective span of the beam, and I is the second moment of inertia of the beam.

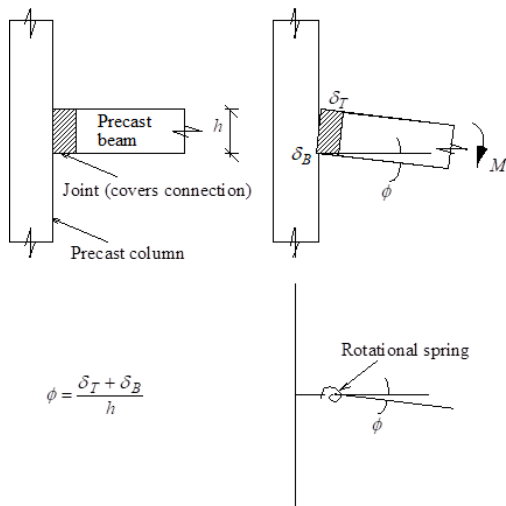


Figure 1: Simplified definition of joint rotation [1]

Generally, only the traditional identification and analysis methods for pin and rigid connections are used in the construction of steel and precast structures. However the actual behaviour of these types of structures is not that simple. The actual behaviour of most column-to-beam connections is known to be non-linear. At braced frames, the attitude of a single span beam can be used in observing the effect of semi-rigid connections on beam model.

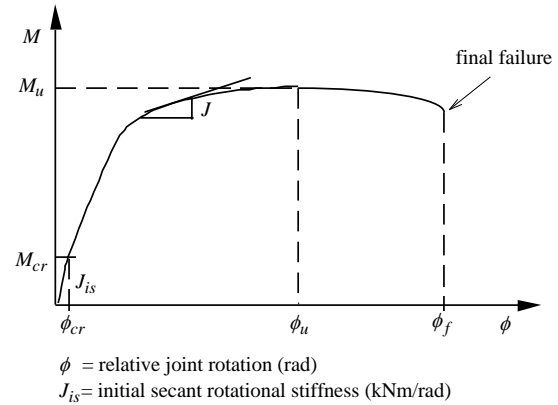


Figure 2: Relationship between Moment-rotation [1]

A simply supported beam subjected to a uniformly distributed load is seen in Figure 3(a). As can be seen from the figure, the maximum bending moment occurs in the mid-span of the beam. Now the simple supports are replaced by fixed ones in Figure 3(b). In this case, the maximum elastic moment occurs at the supports.

A beam that has semi-rigid end connections is seen in Figure 3(c). The maximum elastic bending moment occurs at the supports or at mid-span depending on the flexural stiffness of the connection, however, it always permits a reduction at support. The optimum connections are that going to be the connections those let adequate end rotation to balance the end and mid-span moments ($\frac{ql^2}{16}$). The semi-rigid connection concept is related to such cases as seen in Figure 3(c). The practical assumption about the connections of the above-mentioned structures would be the reflection of non-linear rotational springs at the ends of beams while presenting actual pinned and fully rigid connections by appropriate spring constants. As is well known, iterative solutions with non-linear springs will be required. In this study, nonlinear springs were used in the linear analysis of the planar frame. The analytical results obtained with the formulas were translated and analyzed in the MATLAB programming language.

In the rest of the analytical study, the stiffness matrix coefficients of a straight constant prismatic member of the plane frame have been obtained. A computer program was prepared in MATLAB language for numerical handling of plane frames with semi-rigid connections.

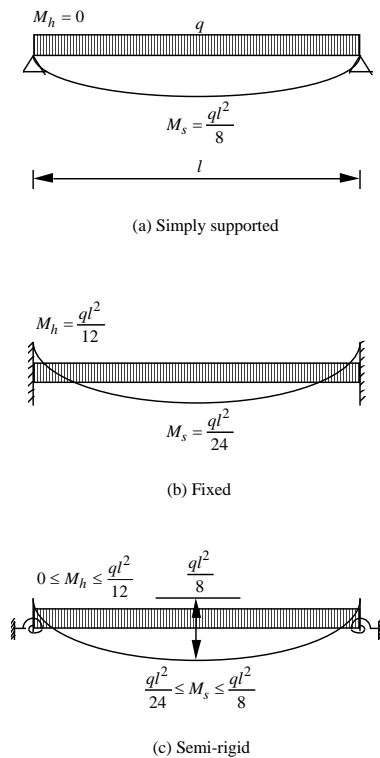


Figure 3. Beam with various end conditions [1]

Previous Studies

Monforton and Wu [2] performed a linear analysis of flexibly connected frames to obtain the stiffness matrix from the relationship between forces and displacements. Livesley [3] examined the element with rotating springs at the ends using the stiffness matrix. Romstad and Subramanian [4] performed the frame analysis for pin, rigid, and semi-rigid (flexible) connections. In their work, they presented moment-relative rotation graphs of flexibly simple frames. Ackroyd and Gerstle [5] investigated a portal frame under vertical loads. It has been observed that the critical load value increases proportionally with the spring constant. Steelmack et al. [6] made some experiments to observe its performability to steel frames by making use of the literature results. When they compared the experimental results with the other results, they observed a satisfactory match. Yu and Shanmugam [7] used a two-story one-bay frame to examine the stability of flexible coupled frames in which they consider the effect of flexure on axial stiffness. They reported that the discrepancy between experimental and analytical results would not exceed 19 percent. Cunningham [8] made some experiments to examine the moment-relative rotation relationships for different connection types between steel elements. Azizinamini and Radzirninski [9] investigated beam-column connections in semi-rigid steel frames. They observed cyclic and static behaviour in semi-rigid steel frames. Aksoğan and Akkaya [10] investigated the linear analysis of planar frames consisting of flexible connected elements with rotating springs at the ends using differential equations with the computer program REDUCE. Using differential equations, they found the stiffness matrix for a

single bar with rotating springs at its ends. For various loading types with the help of stiffness matrix; fixed end forces for uniformly distributed load, linearly distributed load, concentrated load, unsymmetrical triangular distributed load, and symmetrical trapezoidal distributed load were found. Aksoğan and Görgün [11] worked on the nonlinear analysis of semi-rigid coupled frames. They obtained the fixed end forces for various intermediate loads and prepared a computer program on this subject. Aksoğan et al. [12] studied the stability analysis of planar frames consisting of rotational springs with rigid regions at their ends. In this study, the element stiffness matrix based on the element elasticity modulus, a moment of inertia, length, and axial force is given and a computer program for both subjects is prepared. Erdem [13] studied the analysis of frames consisting of elements connected by nonlinear rotational springs with rigid regions at their ends and prepared a computer program. On the other hand, Aksoğan et al. [14] have prepared a computer program for frames with rigid ends, considering nonlinear analysis and nonlinear semi-rigid connections. Ochoa [15] studied the stability and second-order analysis of elastically supported semi-rigid connected planar frames by taking shear force into account. Domenico et al. [16] have proposed a purely probabilistic approach to describe the structural response of beams and frames characterized by indefinite semi-rigid connections and noted that resorting to deterministic approaches can lead to misleading design implications. Artar and Daloğlu [17] obtained a more economical design by using the genetic algorithm method for different structures. Ihaddoudène et al. [18] proposed a mechanical model considering elastic buckling load in plane steel frames and stated that elastic buckling load acts strongly in semi-rigid structures. Ghassemieh et al. [19] included P-Delta effects and material and geometric nonlinearity in all models to investigate the effect of flexibility of extended end plate connections in steel moment frames. And they revealed that there are big differences in the behavior of fully rigid modeled structures in terms of natural periods, strength, and maximum inter-story drift. Du et al. [20] developed a modified low-speed fatigue model for precast concrete frames with semi-rigid connections.

3. Material and Method

In this article, when the material is questioned, the study only includes analytical work and computer programming. This study includes two parts. The first part is composed of the analytical study that operates the matrix method for analysis, usually used in structural analysis. Here, the stiffness matrix of the structure is found. The additives of varied types of loads to the loading vector are obtained. Additionally, the unknown displacements were clarified by the formulation of the equilibrium equations. The second part of the study was composed of preparing a relevant computer program written in MATLAB.

4. Findings, Results, and Discussions

4.1 Analysis

In the analytical study, the matrix analysis for the formulation of the relations between the nodal displacements and the applied loads which cause the nodal displacements is made clear. For this goal, the sign convention for different quantities that belong to the ends of a member should first be specified. The specified sign convention shown in Figure 4, where the six arrows show the positive senses of all quantities at the ends of a member were used in this study. Besides the sign convention, some of the other symbols used in this analysis are also shown in Figure 4.

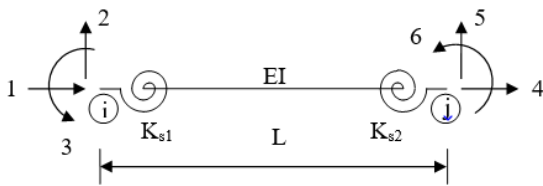


Figure 4. Notation and sign convention.

The semi-rigid end forces p of a straight member, having a constant cross-section, of a plane frame (see Figure 4) in terms of the member end displacements d and fixed end forces f , because of loads between the ends of the member, is given by the well-known formula,

$$p = Kd + f \tag{2}$$

where K is the member stiffness matrix whereas p , d and f are vectors of member end forces, member end displacements, and member fixed end forces, respectively. x shows the distance from the left end of the member while y shows the downward displacements when the others are zero and solving the differential equations,

$$\frac{d^4y}{dx^4} = 0 \tag{3}$$

for every case. The formula given below is taken into account while solving Equation 3.

$$y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D \tag{4}$$

while solving the y value, modified boundary conditions are taken into account, excluding the spring constants.

With the above-stated procedure for a plane frame, member stiffness coefficients are obtained based on its submatrices K_{11} , K_{12} , and K_{22} in

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \tag{5}$$

and defining

$$H_1 = (\beta_1 + \beta_2 + 1),$$

$$H_2 = (2\beta_2 + 1),$$

$$H_3 = 3(\beta_2 + \beta_3) + 1,$$

$$H_4 = (2\beta_1 + 1),$$

$$H_5 = (1 - 6\beta_3),$$

$$H_6 = 3(\beta_1 + \beta_3) + 1 \text{ and}$$

$$H = 4(3\beta_1\beta_2 + \beta_1 + \beta_2) + 12(\beta_1 + \beta_2 + 1)\beta_3 + 1$$

Because of its symmetry the sub-matrices of the member of length L , shear modulus G , cross-sectional area A and uniform flexural rigidity EI , stiffness matrix are given as follow:

$$K_{11} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EIH_1}{L^3H} & \frac{6EIH_2}{L^2H} \\ 0 & \frac{6EIH_2}{L^2H} & \frac{4EIH_3}{LH} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$K_{12} = \begin{bmatrix} -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EIH_1}{L^3H} & \frac{6EIH_4}{L^2H} \\ 0 & -\frac{6EIH_2}{L^2H} & \frac{2EIH_5}{LH} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$K_{22} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EIH_1}{L^3H} & -\frac{6EIH_4}{L^2H} \\ 0 & -\frac{6EIH_4}{L^2H} & \frac{4EIH_6}{LH} \end{bmatrix} \tag{8}$$

where

K_{s1} : Moment value at left support to rotate the spring one radian

K_{s2} : Moment value at right support to rotate the spring one radian

$$k_t = kGA$$

k = A cross-section constant for elements

$$\beta_1 = 1/(4K_{s1}), \beta_2 = 1/(4K_{s2}), \beta_3 = EI/(L^2k_t)$$

As the stiffness matrix mentioned above is symmetrical, K_{21} is the transpose state of K_{12} . In the next step, fixed end forces are determined for different loading conditions on the elements. In Figure 5, semi-rigid end forces are found by applying Equation 2 for a uniformly loaded straight member. Beside the boundary conditions at the ends of the member the compatibility conditions at the loaded point are also used to tackle the problem for semi-rigid end forces. The outcome results will be given later in the paper. Applying Equation (2) the semi-rigid end forces for various types of loads on a member can be determined. Semi-rigid end quantities alone have been given in the following, with respect to Figures. 5-9.

Uniformly Distributed Load

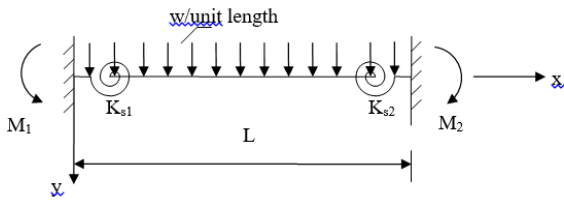


Figure 5. A beam with semi-rigid end connections subjected to uniformly distributed load.

The elastic bending moments occur at the supports:

$$M_1 = \frac{wL^2}{12} \frac{[(6\beta_2+1)+12\beta_3]}{4(3\beta_1\beta_2+\beta_1+\beta_2)+12(\beta_1+\beta_2+1)\beta_3+1} \quad (9)$$

$$M_2 = \frac{wL^2}{12} \frac{[(6\beta_1+1)+12\beta_3]}{4(3\beta_1\beta_2+\beta_1+\beta_2)+12(\beta_1+\beta_2+1)\beta_3+1} \quad (10)$$

Unsymmetrical point load

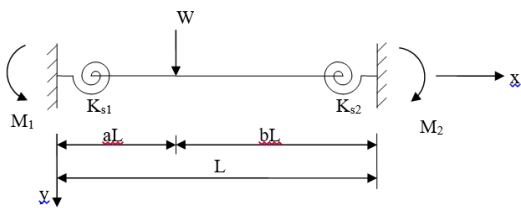


Figure 6. An unsymmetrical point load exposed to a beam with semi-rigid end connections

$$M_1 = WLa \frac{[2\beta_2(a^2-3a+2)+a^2-2a+1]}{4(3\beta_1\beta_2+\beta_1+\beta_2)+1} \quad (11)$$

$$M_2 = WLb \frac{[2\beta_1(b^2-3b+2)+b^2-2b+1]}{4(3\beta_1\beta_2+\beta_1+\beta_2)+1} \quad (12)$$

Linearly Distributed Load

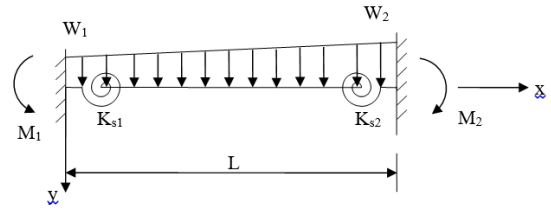


Figure 7. A linearly distributed load exposed to a beam with semi-rigid end connections

$$M_1 = \frac{L^2}{180} \frac{[6(8W_1+7W_2)\beta_2+3(3W_1+2W_2)+90(W_1+W_2)\beta_3]}{4(3\beta_1\beta_2+\beta_1+\beta_2)+12(\beta_1+\beta_2+1)\beta_3+1} \quad (13)$$

$$M_2 = \frac{L^2}{180} \frac{[6(8W_2+7W_1)\beta_1+3(3W_2+2W_1)+90(W_1+W_2)\beta_3]}{4(3\beta_1\beta_2+\beta_1+\beta_2)+12(\beta_1+\beta_2+1)\beta_3+1} \quad (14)$$

Unsymmetrical Trapezoidal Load

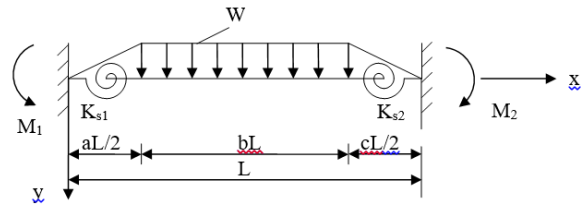


Figure 8. An unsymmetrical trapezoidal load exposed to a beam with semi-rigid end connections

$$M_1 = \frac{WL^2}{96} \frac{[a^3-4a^2+8]}{(2\beta_1+1)} \quad (15)$$

$$M_1 = \frac{WL^2}{96} \frac{[c^3-4c^2+8]}{(2\beta_1+1)} \quad (16)$$

Unsymmetrical Triangular Load

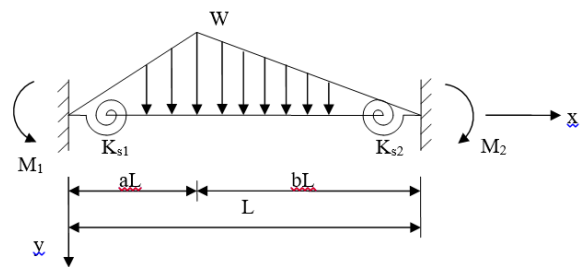


Figure 9. An unsymmetrical triangular load exposed to a beam with semi-rigid end connections

$$M_1 = \frac{WL^2}{60} \frac{[[6a^2(a-4)+16(a+1)]\beta_2+3(a^3+a+1)-7a^2+30(ab+1)\beta_3]}{4(3\beta_1\beta_2+\beta_1+\beta_2)+12(\beta_1+\beta_2+1)\beta_3+1} \quad (17)$$

$$M_2 = \frac{WL^2}{60} \frac{[[6b^2(b-4)+16(b+1)]\beta_2+3(b^3+b+1)-7b^2+30(ab+1)\beta_3]}{4(3\beta_1\beta_2+\beta_1+\beta_2)+12(\beta_1+\beta_2+1)\beta_3+1} \quad (18)$$

4.2 Programming

After the analytical explanations for the problem type shown in Figure 10 a computer program in MATLAB programming language was prepared to solve the problems.

The computer program is basically a supplication of stiffness matrix method to plane frames. The prime difference is the existence of the lengthless flexural springs take place at the ends of beams and the calculation of the relevant stiffness and the semi-rigid end forces correspondingly.

4.3. Discussion and Results

A nonrealistic loading is chosen involving all possible types of loadings, as an example. All necessary information of the structure are given in Figure 10. The joints and members are shown in Figure 11. In the example problem, the standard I section steel frame is used in all beams and columns.

The element data information used in the example is taken from studies in the literature. The cross-sectional area used in all elements is 0.48 ft² and the moment of inertia is 0.00722 m⁴. In addition, the spring constants (K_{s1} and K_{s2}) in all elements are given as 0.5 for external connections and 0.6 for internal connections for typical beams.

The results of semi-rigid end quantities for the beam and columns are shown in Table 1. The rest of results as joint displacements and mid-span sagging moments could not be given because of restricted page numbers.

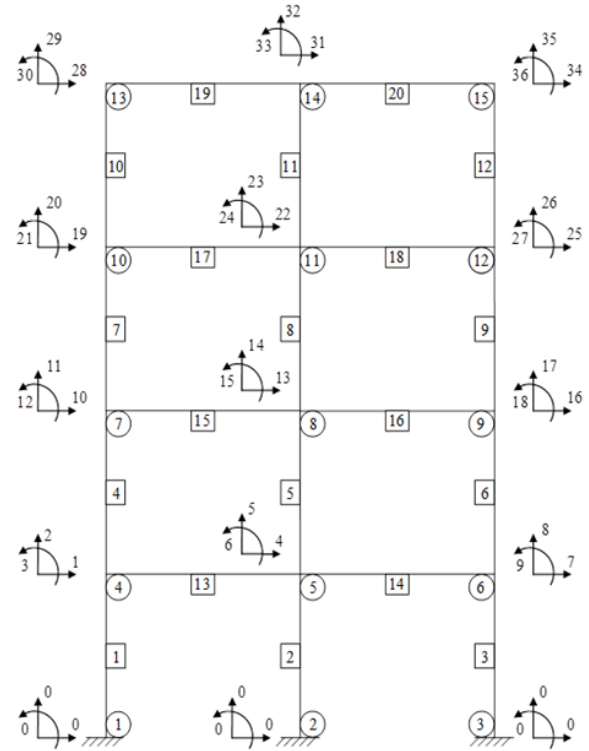


Figure 11. Coding of joints and numbering of members

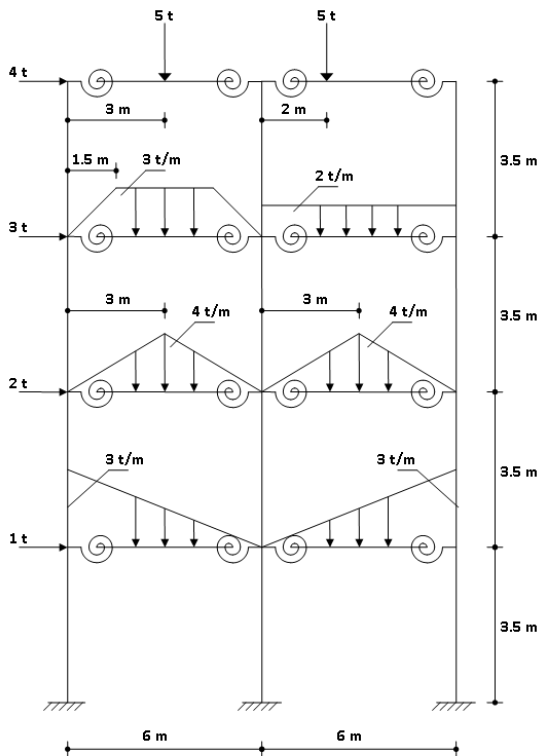


Figure 10. An example of geometry and loading

Table 1. Member end forces

No	M1 (kNm)	M2 (kNm)	T1 (kN)	T2 (kN)	N2 (kN)
1	-15.70	108.40	26.49	-26.49	-158.75
2	16.21	119.28	38.71	-38.71	-355.57
3	6.06	115.76	34.81	-34.81	-260.68
4	15.59	38.54	15.46	-15.46	-113.78
5	61.60	79.50	40.32	-40.32	-297.44
6	52.87	66.90	34.22	-34.22	-183.79
7	21.19	-0.03	6.07	-6.07	-71.45
8	70.56	49.14	34.20	-34.20	-178.87
9	62.54	41.50	29.73	-29.73	-104.68
10	8.64	-20.72	-3.45	3.45	-16.73
11	58.61	26.04	24.18	-24.18	-55.29
12	50.26	17.17	19.27	-19.27	-27.98
13	-22.84	-67.32	44.98	45.03	1.02
14	-28.39	-72.96	13.11	76.89	-0.58
15	-15.55	-90.49	42.33	77.67	-10.61
16	-20.26	-94.37	40.90	79.11	-4.50
17	-0.58	-76.10	54.72	80.28	-20.48
18	-20.50	-79.71	43.30	76.70	-10.46
19	-8.64	-40.98	16.73	33.27	-43.45
20	-17.63	-50.26	22.02	27.98	-19.27

In the figures given below, the effect of the spring constants on the displacements in Figure 12, the variation of the bending moments at the supports with the spring constants K_s in the Figure 13, and the effect of the spring constants K_s on the height of the structure are shown in Figure 14, respectively. Table 2 shows the effect of spring constants on displacements.

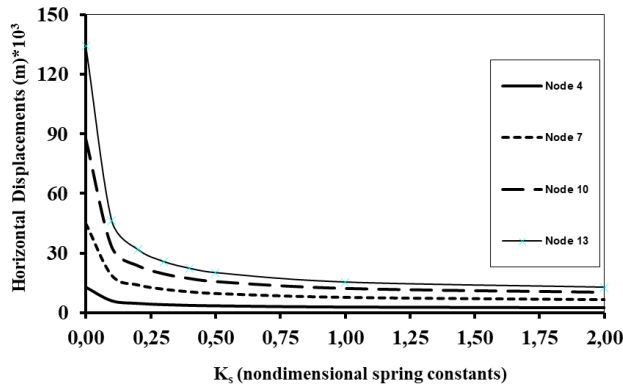


Figure 12. In the example problem, the spring constants (K_s) and displacement relation at each floor level

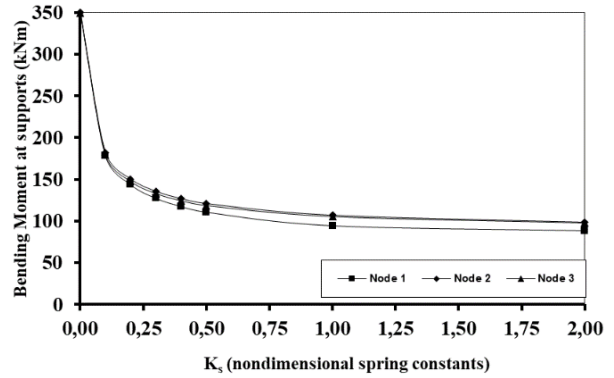


Figure 13. Variation of bending moments at the supports with spring constants (K_s) in the example problem

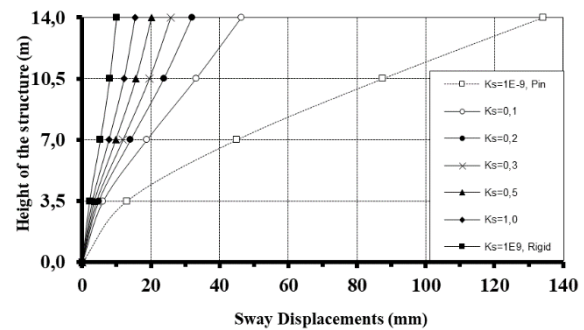


Figure 14. In the example problem, the spring constants (K_s) and height of the structure

Table 2. Variations in the horizontal displacements due to spring constants K_s at floor levels

Height of the structure (m)	Horizontal displacements (mx10 ³)									
	K_s									
	Pinned		Semi-Rigid					Rigid		
	1E-9	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1,0	2,0	1E9	
14,00	134,220	46,358	31,885	25,780	22,380	20,202	15,462	12,854	10,038	
10,50	87,527	33,134	23,694	19,565	17,204	15,663	12,214	10,245	8,048	
7,00	44,958	18,840	14,043	11,865	10,587	9,738	7,784	6,630	5,300	
3,00	12,992	6,100	4,771	4,148	3,775	3,524	2,931	2,570	2,143	

Conclusion

In this study by taking into account the linear analysis of plane frames made of flexibly connected straight prismatic element, the efficacy of shear deformations is handled. Then for the numerical calculations a computer programme is prepared. Various kinds of span loadings were taken into account. When the literature was reviewed, no study related to aperture loading was found. The results were checked and analyzed according to the loading conditions given in the article. In the analyzed example, it was found that as the spring constants of the flexible connections get smaller, the displacements increase and at the same time the critical extreme values of the bending moments increase.

References

[1] H. Görgün, "Semi-rigid Behaviour of Connections in Precast Concrete Structures" University of Nottingham (1997), Ph.D. Thesis.

[2] A. R. Monforton, and T. S. Wu, "Matrix analysis of semi-rigidly connected frames", Journal of Structural Division, ASCE, 1963, 89, pp. 13-42.

[3] R. K Livesley, "Matrix methods of structural analysis", Pergamon Press, Inc., 1964, New York, N.Y.

[4] K. M. Romstad, and C. V. Subramanian, "Analysis of Frames with Partial Connection Rigidity", Journal of

- Structural Division, ASCE, 96, pp. 2283-2300, November, 1970.
- [5] M. R. Ackroyd. and K. H: Gerstle, "Elastic Stability of Flexibly Connected Frames", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 1, pp. 241-245, January, 1983.
- [6] T. W. Stelmack, M.J. Marley, and K. R: Gerstle, "Analysis and Tests of Flexibly Connected Steel Frames", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 7, pp. 1573-1588, July, 1986.
- [7] C. R. Yu, and N. E: Shanmugam, "Stability of Frames with Semi-Rigid Joints", Comput. Struct., Vol. 23, No. 5, pp. 639-648, 1986.
- [8] R. Cunningham, "Some Aspects of Semi-Rigid Connections in Structural Steelwork", The Structural Engineer, Vol. 68, No. 5, pp.85-92, March, 1990.
- [9] A. Azizinamini, and J. B. Radzimirski, "Static and Cyclic Performance of Semi-Rigid Steel Beam-To-Column Connections", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115, No.12, pp. 2979-2999, December, 1989.
- [10] O. Aksogan, and F. Akkaya, "A Computer Program for the Analysis of Flexibly Connected Frames", Ç.Ü J.Fac.EngArch., Vol. 6, No. 2, pp.25-41, December, 1991.
- [11] O. Aksogan, and H. Görgün, "The Nonlinear Analysis of Planar Frames Composed of Flexibly Connected Members", Ç.Ü J. Fac. Eng. Arch., Vol. 8, No. 2, pp.117-129, December, 1993.
- [12] O. Aksogan, S. S. Akavcı., and H. Görgün, "Analysis of Frames with Flexible Connections", Ç. Ü J. Fac. .Eng. Arch., Vol. 20, No. 1, pp.1-11, June, 2005.
- [13] H. Erdem, "Yarı Rijit Bağlantılı ve Rijit Uc Bölgesi Düzlemsel Cercevelerin Nonlineer Analizi", Turkish J. Eng. Env. Sci. 26, 2001, pp. 209–218.
- [14] H. Görgün, O. Aksogan, and S. Yılmaz, "The linear analysis of planar frames composed of flexibly connected members taking shear deformations into consideration" Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2008, Vol. 23, No.1, pp:1-14
- [15] J. D. Aristizabal-Ochoa, "Matrix method for stability and second-order analysis of Timoshenko beam-column structures with semirigid connections", Eng. Struct., 34, 2012, pp. 289-302.
- [16] D. De Domenico, Giovanni F. and R. Laudanib. "Probability-based structural response of steel beams and frames with uncertain semi-rigid connections" Structural Engineering and Mechanics, 2018, Vol. 67, No. 4, pp. 439-455.
- [17] M. Artar and A. T. Daloğlu, "Optimum design of composite steel frames with semi-rigid connections and column bases via genetic algorithm", Steel and Composite Structures, 2015, Vol. 19, No. 4, pp. 1035-1053.
- [18] A. N. T .Ihaddoudènea, M. Saidanib, and J. P. Jaspardc, "Mechanical model for determining the critical load of plane" frames with semi-rigid joints subjected to static loads", Engineering Structures, 145, pp. 109-117.
- [19] M. Ghassemieh,; M. Baei; A. Kari, A. Goudarzi, and D. F. Laefer "Adopting flexibility of the end-plate connections in steel moment frames", Steel and Composite Structures, Vol.18, No. 5, pp:1215-1237.
- [20] B Du, W Jiang, Z He, Z Qi, C Zhang- "Development of a modified low-cycle fatigue model for semi-rigid connections in precast concrete frames", Journal of Building Engineering, Vol. 50, No.1, June 2022.



Araştırma Makalesi/Research Article

Katkı türü ve oranının yüksek plastisiteli kilin kompaksiyon parametrelerine etkisi

*The effect of additive type and ratio on the compaction parameters of high plasticity clay*Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU*¹, Zülfü GÜROCAK²¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, yaslan@firat.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3135-5926>²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, zgurocak@firat.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1049-8346>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 7 Nisan 2022
Revizyon 6 Mayıs 2022
Kabul 18 Haziran 2022
Online 28 Haziran 2022

Anahtar Kelimeler:

Kil, kompaksiyon, pozolan,
stabilizasyon, aglomerasyon

ÖZ

Puzolanik özelliğe sahip katkı malzemeleri kullanılarak killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi olarak tanımlanan stabilizasyon, kolay uygulanabilir, ekonomik ve birçoğunun çevre dostu olması nedeniyle günümüzde çok fazla tercih edilmektedir. Killi zeminlere farklı puzolanlar katılarak başarılı bir stabilizasyon sonrasında oluşan dokusal değişimler sonucunda zeminin kompaksiyon parametreleri olarak adlandırılan optimum su içeriği değeri artarken, maksimum kuru birim ağırlığı ise azalmaktadır.

Bu çalışmada, farklı tür ve oranda kullanılan katkı malzemelerinin yüksek plastisiteli bentonitin kompaksiyon parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla katkı malzemesi olarak sönmüş kireç, uçucu kül, asidik ve bazik karakterli tüflerin değişik oranlarda kullanıldığı katkılı örnekler hazırlanmış ve bu örneklerde Standard Proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, sadece bir katkı malzemesinin kullanılması durumunda en iyi sonuçlar %5 asidik tuf katkılı örnekte ve %10 sönmüş kireç katkılı örnekte elde edilmiştir. İki tip katkı malzemesini birlikte kullandığı örneklerde ise en iyi sonuçlar %10 oranında asidik tuf ve sönmüş kirecin birlikte kullanıldığı örnekte ortaya çıkmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, özellikle sönmüş kireç ve asidik tuf katkısının birlikte kullanılması durumunda kompaksiyon parametrelerinde en iyi sonuçların elde edildiğini göstermektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 April 2022
Received in revised form 6 May 2022
Accepted 18 June 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Clay, compaction, pozzolan,
stabilization, agglomeration

ABSTRACT

Stabilization, which is defined as the improvement of the geotechnical properties of clayey soils by using additives with pozzolanic properties, is highly preferred today because it is easy to apply, economical and many of them are environmentally friendly. As a result of the textural changes that occur after successful stabilization by adding different pozzolans to the clayey soils, the optimum water content value, which is called the compaction parameters of the soil, increases, while the maximum dry unit weight decreases. In this study, the effects of additives used in different types and ratios on the compaction parameters of high plasticity bentonite were investigated. For this purpose, samples with additives using slaked lime, fly ash, acidic and basic tuffs in different proportions were prepared and Standard Proctor tests were carried out on these samples. According to the results obtained from the studies, the best results were obtained in the case of using only one additive material, in the sample with 5% acidic tuff and in the sample with 10% slaked lime. In the examples where two types of additives were used together, the best results were obtained in the example where 10% acidic tuff and slaked lime were used together. The results obtained from this study show that the best results are obtained in compaction parameters, especially when slaked lime and acidic tuff additive are used together.

Doi: 10.24012/dumf.1099931

* Sorumlu yazar

1. Giriş

Stabilizasyon, mühendislik gereksinimlerini karşılamak için killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin değiştirilmesi işlemidir [1] ve killerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu amaçla, farklı özelliklere sahip çok sayıda katkı malzemesi kullanılmaktadır. Kireç, çimento, uçucu kül, silis dumanı, tuf, volkanik cam, volkanik kül, şeyl ve diatomit gibi katkı malzemeleri zemine ait elementlerle kimyasal reaksiyona girerek kilin geoteknik özelliklerini iyileştirirken [2]-[23], jeofiber ve jeogrid gibi diğer katkı malzemeleri ise fiziksel etkileri ile zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirmektedir [24],[25]. Zemindeki elementlerle kimyasal reaksiyona giren katkı malzemeleri ilk olarak zeminin su içeriğinin azalmasına ve daha kolay işlenebilir hale gelmesine; uzun sürede ise zeminin dayanım, sıkışabilirlik ve duraylılık özelliklerinde iyileşmelere neden olmaktadır [8],[26],[27],[28]. Stabilizasyonla zemini oluşturan taneler büyük boyutlu kümeler haline gelmekte ve böylece zemin dokusu değişmektedir. Topaklanma olarak tanımlanan bu olay sonucunda zeminin boşluk oranı ve optimum su içeriği artmakta, maksimum kuru yoğunluğu ise azalmaktadır [29].

Stabilizasyonda kullanılacak katkı malzemenin ekonomik ve çevre dostu olması da büyük önem taşımaktadır. Nitekim, kireç, çimento, silis dumanı gibi katkıların kullanımı stabilizasyon maliyetini artırmakta ve bu katkı maddelerinin üretildiği tesisler karbon salınımına ve iklim değişikliğine neden olmaktadır [30]. Bu nedenlerden dolayı, killerin stabilizasyonunda kullanılacak malzemenin, zeminin geoteknik özelliklerini amaca uygun hale getirmesi ile birlikte ekonomik, kolay elde edilebilir ve çevreci olması da önemlidir. Yapılan çalışmalarda [31]-[35] pomza, perlit ve tuf gibi malzemelerin zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar özellikle volkanik kül ve tüflerin zeminlerin stabilizasyonunda oldukça etkili olduğunu ve kullanılabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, farklı tip ve oranda kullanılan katkı malzemelerinin bentonitin kompaksiyon parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla katkı malzemesi olarak sönmüş kireç, uçucu kül, asidik ve bazik karakterli tüfler seçilmiş ve bu katkı malzemeleri farklı oranlarda bentonite eklenerek hazırlanan örneklerde Standard proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, bentonitin optimum su içeriği (w_{opt}) değerinde en fazla artışa, kuru birim ağırlığında (γ_k) en fazla azalmaya neden olan karışım tip ve oranları belirlenmiştir.

2. Materyal ve metod

2.1. Bentonit ve katkı malzemelerinin özellikleri

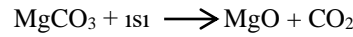
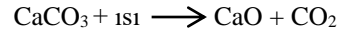
Deneysel çalışmalarda, Tokat-Reşadiye (Turkey) kil ocağında üretilen katkısız bentonit kullanılmıştır (Şekil 1). Bentonitin ilk kez literatüre girişi 1876 yılında sabun kili adıyla olmuştur. Bentonit ismi bulunduğu Rock Creek sahasındaki Ford Benton'dan gelmektedir. Bentonit kili, alüminyum ve magnezyum içeriği bakımından zengin volkanik kül, lav ve tüflerin kimyasal ayrışması ya da bozulması sonucunda meydana gelen montmorillonit

ailesine mensup bir kil mineralidir [36],[37] ve kimyasal olarak hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşmaktadır. Dane boyutu 2 μm (0.002 mm) veya daha küçüktür ve en ayırt edici özelliği su ile etkileşime geçmeleri halinde şişerek hacimlerinde büyük değişimler meydana getirmeleridir. Yoğunluğu 2.6 gr/cm^3 civarında olup, iyonlaşma kapasitesi oldukça yüksek olan bentonitin plastisitesi yüksektir ve koloidal özelliğe sahip bir kil çeşididir [38]. Bentonitte yapılan XRF analiz sonuçlarına göre (Tablo 1) bu çalışmada kullanılan kil Na-bentonittir.



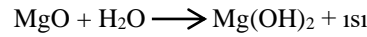
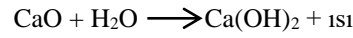
Şekil 1. Çalışmada kullanılan bentonit kili

Kireç, su ile karıştırıldığında, başlangıçta plastik sonra gittikçe sertleşen anorganik bir bileşiktir ve hammaddesi ise kireçtaşı (CaCO_3) ve dolomit ($\text{CaCO}_3+\text{MgCO}_3$)'tir. Kireçtaşının öğütülerek, 900°C'nin üzerinde döner fırınlarda pişirilmesi (kalsinasyon) ile aşağıdaki reaksiyon oluşur;



} Sönmemiş kireç

Bu reaksiyon sonucunda oluşan CaO , sönmemiş kireçtir. CaO su ile karıştırıldığında, büyük ısı (300-400 °C) açığa çıkarır ve aşağıdaki reaksiyon meydana gelir;



} Sönmüş kireç

Bu işleme kirecin söndürülmesi işlemi ve Ca(OH)_2 'e ise sönmüş kireç denir. Fabrikalarda elde edilen sönmüş kireç yalnızca Ca(OH)_2 olup ince toz halindedir ve torbalar halinde satılır buna hidrate kireç de denir.

Killi zemine kireç eklendiği zaman, katyon değişimi ve flokülasyon gibi kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir ve bu reaksiyonların bütününe puzolanik reaksiyonlar adı verilir. Bu reaksiyonlar kısa vadeli ve uzun vadeli iyileşmeler sağlar. Kısa vadeli iyileşmeler, katyon değişimi ve flokülasyon-aglomerasyon sonucu, uzun vadeli iyileşmeler ise puzolanik reaksiyonlar sonucu olmaktadır [39].

Bu çalışmada Karaca Harput CL 80.S marka sönmüş kireç kullanılmıştır (Şekil 2). Kullanılan sönmüş kirece ait XRF

analizi sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre sönmüş kireç %70 oranında CaO’dan oluşmaktadır. MgO oranının çok düşük (%0.57) olması, bu kirecin üretildiği ana kayanın dolomitik olmadığını göstermektedir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan sönmüş kireç

Tablo 1. Bentonit ve katkı malzemelerinin kimyasal özellikleri [40].

Ana Oksit (%)	Bentonit	Sönmüş Kireç	Uçucu Kül	Asidik Tüf	Bazik Tüf
SiO ₂	62.50	1.55	29.20	69.10	31.40
Al ₂ O ₃	17.60	0.44	11.30	20.70	7.15
Fe ₂ O ₃	3.63	0.14	6.18	0.47	3.49
MgO	2.00	0.57	2.84	0.19	2.11
CaO	2.86	70.10	34.20	0.76	28.70
Na ₂ O	2.58	0.26	2.01	0.39	0.60
K ₂ O	0.92	0.07	0.71	1.43	0.87
TiO ₂	0.32	0.04	0.63	0.29	0.41
MnO	0.10	0.05	0.05	<0.01	0.03
P ₂ O ₅	0.14	0.04	0.42	0.06	0.09
SO ₃	0.076	1.39	9.78	0.90	0.036
Cr ₂ O ₃	<0.01	<0.01	0.04	<0.01	0.02
Sr	0.073	0.015	0.05	0.024	0.033
Ateşte Kayıp	6.60	26.40	3.60	5.50	24.80

Uçucu küller, toz halinde ya da öğütülmüş, taş kömürü veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu oluşan ve baca gazları ile sürüklenen silis ve alümina-silisli toz halindeki bir yanma kalıntısıdır [41]. Oluşan baca gazları ile birlikte taşınan çok hafif uçucu küller bacadan önce bulunan elektro-filtre veya siklon adı verilen toz tutucularda, elektrostatik veya mekanik yöntemlerle tutulurlar. Bu küller daha sonra toz tutucuların alt kısmında bulunan haznelerde biriktirilir ve düzenli olarak santral dışına alınırlar. Genelde küresel bir yapıya sahip ve çapları 1-150 mikron mertebesinde olan uçucu küllerin en büyük önemi, ani soğuma sonucu puzolanik bir özellik kazanmalarıdır [42-43-44]. ASTM C 618’e [45] göre uçucu küller, F ve C olarak iki gruba ayrılmaktadırlar. F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ yüzdesi %70’den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde reaktif kireç (CaO) yüzdesi %10’un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar ve puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ miktarı %50’den fazla olan küllerdir. Aynı

zamanda, C sınıfı uçucu küllerde CaO %10’dan fazla olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül Afşin-Elbistan Termik santralinden temin edilmiş olup (Şekil 3), mineralojik ve kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla XRF analizleri yaptırılmıştır (Tablo 1). XRF analiz sonuçlarına göre, bu çalışmada kullanılan uçucu kül ASTM C 618’e [45] göre C sınıfındadır.



Şekil 3. Çalışmada kullanılan uçucu kül

Katkı malzemesi olarak kullanılan asidik karakterli tüf Gümüşhane ili ve civarında yüzeyleme veren Kızılkaya Formasyonun’dan (Şekil 4), bazik karakterli tüfler ise Elazığ ili Ağın bölgesinde yüzleme veren Karabakır Formasyonu’ndan (Şekil 5) derlenmiştir.



Şekil 4. Blok ve öğütülmüş asidik tüf



Şekil 5. Blok ve öğütülmüş bazik tüf

XRF analizi sonuçlarına göre Kızılkaya Formasyonundan derlenen tüflerin SiO₂ miktarı %63'den fazladır ve tuf asidik karakterlidir. Karabakır Formasyonu'na ait tüflerde kimyasal olarak tüflerin SiO₂ miktarı %45'den azdır ve bazik karakterlidir (Tablo 1).

2.2. Laboratuvar çalışmaları

Bu çalışma kapsamındaki laboratuvar çalışmaları, örnek hazırlama, bentonitin kıvam limitlerinin belirlenmesi ve hazırlanan katkılı örneklerde standard proktor deneylerinin yapılması şeklindedir. Deneysel çalışmalar Fırat Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kaya-Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Örnek hazırlama

Asidik ve bazik karakterli tüfler gerçekleştirilen arazi çalışması ile derlenmiş ve laboratuvara getirilen tuf blokları öğütülerek 200 nolu elekten elenmiştir. Ayrıca uçucu kül ve sönmüş kireçte 200 nolu elekten elenerek deneylere hazır hale getirilmiştir. Bentonit kili ilk olarak 24 saat 105 °C'de etüvde kurutulmuş daha sonra önceden belirlenen oranlarda kuru halde tuf katkı malzemeleriyle iyice karıştırılmıştır. Katkılı bentonit karışımlarının üzerine distile su eşit olarak püskürtülmüş ve el ile tekrar karıştırılmıştır. Zemin ve katkı maddelerinin tam olarak karışmasını sağlamak için karıştırma işleminin süresi 5 dakika olarak seçilmiştir.

2.2.2. Kıvam limiti ve Standard Proktor deneyleri

Zeminlerin kıvamı; danecikleri arasındaki adezyon kuvvetini, yük karşısında kayma direncini ve stabilitesini, suyla değişen katılığını ve hangi su içeriğinde hangi katılığa sahip olacağını belirleyen en temel özelliktir. Zeminin kıvamının tanımlanmasında kullanılan en önemli parametre ise Kıvam (Atterberg) Limitleri'dir. Bu limitler, zemin davranışında belirli limitlerdeki veya kritik aşamalarda su içeriklerini ifade etmektedir. Zemin özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir yeri olan Kıvam Limitleri, zeminin sınıflandırılmasında ve zeminin kıvam özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Kıvam limitleri; likit limit (LL), plastik limit (PL) ve rötre limit (RL)'den oluşmaktadır [46]-[48]. Laboratuvar çalışmalarının bu aşamasında, bentonit kilinin likit limit ve plastik limit değerlerini belirlemek için ASTM D4318 [49] standardına göre laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kıvam limiti deney sonuçlarına göre bentonitin likit limiti (LL) % 507, plastik limiti (PL) % 41, plastisite indisi (PI) ise % 466 olarak hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında ise bentonite kuru ağırlıkça % 5, % 10, % 20 oranlarında sönmüş kireç, uçucu kül, asidik tuf ve bazik tuf katılarak tek katkılı örnekler ve iki farklı katkı malzemesinin farklı oranlarda bentonite eklendiği örnekler hazırlanmıştır. Bu örneklerde ASTM D 698 [50] standardına göre standard proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Standard proktor deneyinin yapılışı ve sıkıştırılmış bir örnek

Bu deney, 30.5 cm yükseklikten serbest düşmeye bırakılan 2.5 kg'lık yük altında zeminin üç tabaka halinde kalıp (mold) içerisine sıkıştırılması ile maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) parametrelerinin belirlenmesi için gerçekleştirilir. Bu çalışma kapsamında tam otomatik proktor aleti kullanılarak yapılan Standard proktor deneylerine ait sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Standard proktor deneylerine ait sonuçlar.

Örnek	w_{opt} (%)	γ_{kmax} (kN/m ³)
K	38.50	12.36
K + % 5 KRÇ	40.91	10.49
K + % 10 KRÇ	43.00	10.30
K + % 20 KRÇ	43.50	10.38
K + % 5 BT	40.00	10.98
K + % 10 BT	46.10	10.60
K + % 20 BT	43.00	10.79
K + % 5 AT	48.00	10.77
K + % 10 AT	39.00	10.65
K + % 20 AT	40.00	11.57
K + % 5 UK	41.00	11.40
K + % 10 UK	42.88	11.28
K + % 20 UK	43.03	11.30
K + % 5 AT + % 10 KRÇ	65.00	8.83
K + % 10 AT + % 10 KRÇ	70.00	8.53
K + % 5 BT + % 10 KRÇ	56.00	9.61
K + % 10 BT + % 10 KRÇ	57.00	9.51
K + % 5 AT + % 10 UK	56.00	9.91
K + % 10 AT + % 10 UK	52.50	10.10
K + % 5 BT + % 10 UK	54.00	9.71
K + % 10 BT + % 10 UK	50.00	10.40
K: Kil	AT: Asidik tuf	
KRÇ: Sönmüş kireç	BT: Bazik tuf	
UK: Uçucu kül		

3. Deneysel sonuçların değerlendirilmesi

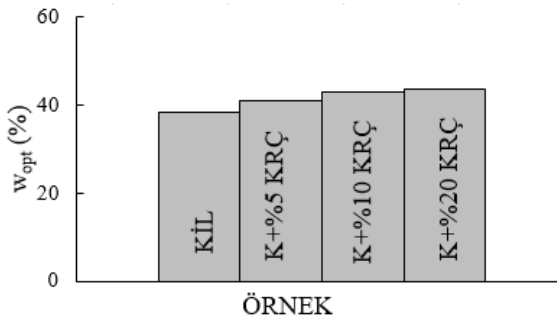
Tablo 2'de verilen deney sonuçlarına göre; katkısız bentonit kilinin ortalama w_{opt} değeri %38.50, ortalama γ_{kmax} değeri ise 12.36 kN/m³ iken katkılı örneklerde w_{opt} değerleri %39-70 arasında, γ_{kmax} değerleri ise 8.53-11.57 kN/m³ arasında değişim göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde katkısız kile sönmüş kireç, uçucu kül, asidik ve bazik tuf katkılı eklendiğinde karışım türüne ve oranına bağlı

olarak tüm karışımlarda w_{opt} değerleri artmakta, γ_{kmax} değerleri ise azalmaktadır (Tablo 2).

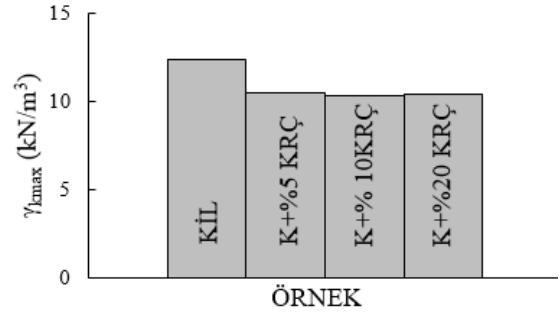
Tablo 3. Tek katkı malzemesi kullanılan örneklerin w_{opt} ve γ_{kmax} değerlerindeki % değişimler.

Örnek Adı	w_{opt} (%)	Değişim (%)	γ_{kmax} (kN/m ³)	Değişim (%)
K	38.50		12.36	
K + % 5 KRÇ	40.91	6.26	10.49	-15.13
K + % 10 KRÇ	43.00	11.69	10.30	-16.67
K + % 20 KRÇ	43.50	12.99	10.38	-16.02
K + % 5 BT	40.00	3.90	10.98	-11.17
K + % 10 BT	46.10	19.74	10.60	-14.24
K + % 20 BT	43.00	11.69	10.79	-12.70
K + % 5 AT	48.00	24.68	10.77	-12.86
K + % 10 AT	39.00	1.30	10.65	-13.83
K + % 20 AT	40.00	3.90	11.57	-6.39
K + % 5 UK	41.00	6.49	11.40	-7.77
K + % 10 UK	42.88	11.38	11.28	-8.74
K + % 20 UK	43.03	11.77	11.30	-8.58

Bentonite %5, %10, %20 oranlarında sönmüş kireç katkısı eklendiğinde w_{opt} değerindeki en büyük değişim %12.99'luk bir artışla %20 sönmüş kireç katkılı örnekte meydana gelmiştir. Bu örneğin w_{opt} değerinde meydana gelen artış %10 sönmüş kireç katkılı örnekte meydana gelen artışa çok yakındır. Ağırlıkça %10 sönmüş kireç katkısından sonra katkı oranının %20'ye çıkarılmasıyla, w_{opt} değeri sınırlı bir artış göstermiş ve %12.99 olmuştur. Benzer durum örneğin γ_{kmax} değerlerinde meydana gelen azalmada da görülmüştür. Nitekim sönmüş kireç katkılı örneklerde katkı oranının artmasına bağlı olarak belirlenen azalmalar hemen hemen aynıdır. Katkisız kile göre değerlendirildiğinde, %5 sönmüş kireç katkılı örneğin γ_{kmax} değerinde görülen azalma oranı %15.13 iken katkı oranının %10'a çıkarılması durumunda bu azalma oranı %16.67, katkı oranının %20 olması durumunda ise %16.02 olarak belirlenmiştir. Bu değerler sönmüş kireç katkısının %10'u aşması durumunda w_{opt} değerindeki artış ve γ_{kmax} değerindeki azalmaların çok sınırlı kaldığını göstermektedir (Tablo 3, Şekil 7, 8).

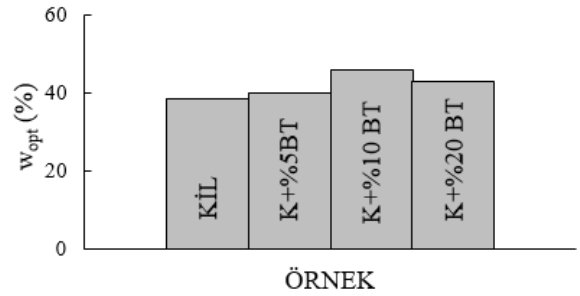


Şekil 7. Sönmüş kireç katkılı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

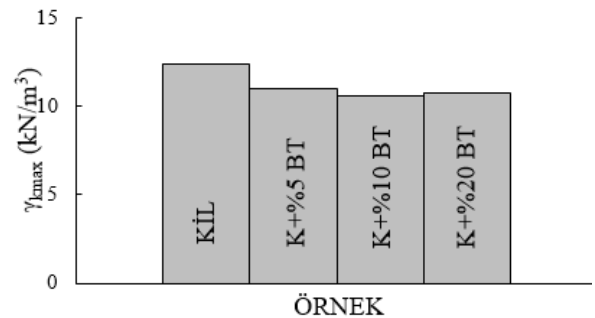


Şekil 8. Sönmüş kireç katkılı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Bazı karakterli tuf katkısının kullanıldığı örneklerin w_{opt} değerlerinde en büyük artış %10 bazık tuf katkılı örnekte meydana gelmiştir. Artış oranı ise %19.74'tür. Ancak katkı oranının %20'ye yükseltilmesiyle birlikte w_{opt} değeri önemli ölçüde azalma göstermektedir. Benzer durum bu gruptaki örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki azalmalar için de geçerlidir. %5 bazık tuf katkılı örneğin γ_{kmax} değerindeki azalma oranı %11.17 iken, bu azalma oranı %10 katkılı örnekte %14.24, %20 katkılı örnekte ise %12.70 olarak belirlenmiştir. Bu değerler bazık tuf katkısının %10'u aşmasıyla birlikte γ_{kmax} değerindeki azalmanın sınırlı kaldığını göstermektedir (Tablo 3, Şekil 9, 10).



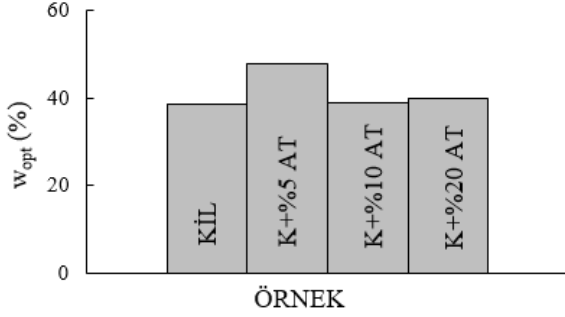
Şekil 9. Bazık tuf katkılı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.



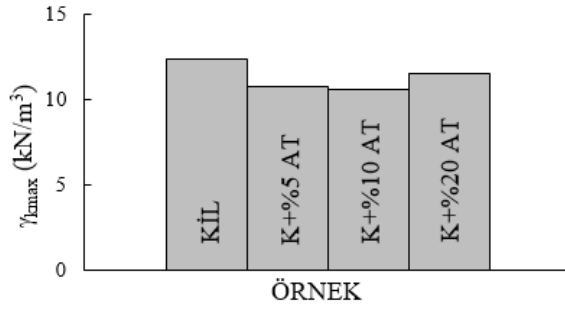
Şekil 10. Bazık tuf katkılı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Katkı malzemesi olarak asidik karakterli tufün bentonite eklenmesiyle elde edilen örneklerin w_{opt} değerlerindeki en büyük artış %5 asidik tuf katkılı örnekte meydana gelmiştir ve bu artış katkisız kile göre %24.68'dir. Katkı oranının %5'ten daha fazla olması durumunda ise w_{opt} değerleri ciddi şekilde azalmaktadır. Katkı oranının %10 ve %20 olduğu örneklerin w_{opt} değerlerindeki artışlar sırasıyla %1.30 ve

%3.90'dır. Bu örneklerin w_{opt} değerleri katıksız bentonit ile hemen hemen aynıdır. Asidik tüf katkılı örneklerin γ_{kmax} değerleri incelendiğinde, asidik tüf katkısının %5 olmasıyla birlikte γ_{kmax} değerinde meydana gelen azalma %12.86 iken katkı oranının %10'a çıkarılması durumunda γ_{kmax} değerinde meydana gelen azalma oranı sınırlı bir artış göstermiş ve %13.83 olarak belirlenmiştir. Katkı oranının %20 olduğu örnekte ise γ_{kmax} değerindeki azalmalar %6.39'da kalmıştır (Tablo 3, Şekil 11, 12).

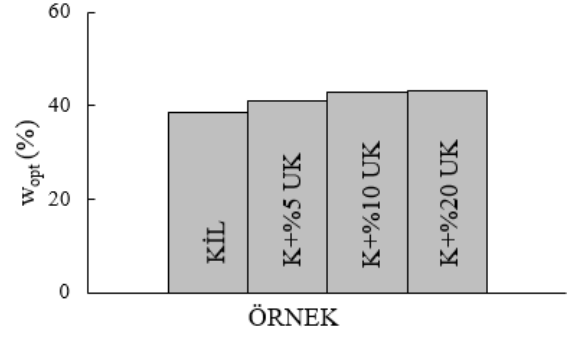


Şekil 11. Asidik tüf katkılı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

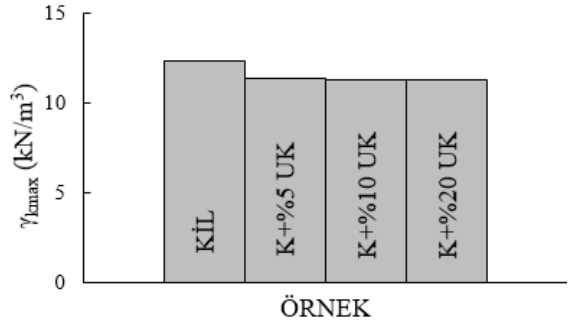


Şekil 12. Asidik tüf katkılı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Uçucu külün katkı malzemesi olarak kullanıldığı örneklerde ait w_{opt} değerlerinde meydana gelen değişimler incelendiğinde; katkı oranının %5 olduğu örneğin w_{opt} değerindeki artış %6.49 iken, %10 katkılı örnekte %11.38, %20 katkılı örnekte ise %11.77 olduğu görülmektedir. Bu artış oranları, optimum katkı oranının %10 olduğunu bu orandan daha fazla oranlarda uçucu kül katkısının w_{opt} değerinde meydana getirdiği artışın sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu gruptaki örneklerin γ_{kmax} değerleri katkı oranının %5 olmasıyla birlikte %11 civarında azalma göstermiş ancak katkı oranının %10 ve %20 yapılması durumunda γ_{kmax} değerlerinde kayda değer bir azalma gözlenmemiştir (Tablo 3, Şekil 13, 14).



Şekil 13. Uçucu kül katkılı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.



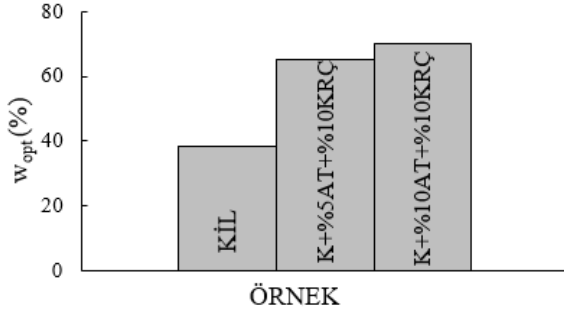
Şekil 14. Uçucu kül katkılı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Yapılan çalışmalarda başarılı bir stabilizasyon sonrasında stabilize edilen killi zeminde meydana gelen topaklanmanın etkisiyle zeminin w_{opt} değerinin arttığını, γ_{kmax} değerinde ise azalma meydana geldiğini belirtmektedir [29]. Bu bilgi dikkate alındığında, sadece bir katkı malzemesi kullanılarak hazırlanan örneklerden elde edilen sonuçlara göre (Tablo 3), sönmüş kireç ve uçucu kül katkılarının kullanıldığı örneklerde w_{opt} değerlerinde en fazla artışı ve γ_{kmax} değerlerindeki en fazla azalmayı sağlayan optimum katkı oranının %10 olduğu görülmektedir. Bazik ve asidik karakterli tüf katkılı örneklerde ise optimum katkı oranı %5 veya %10'dur. Bu nedenle örneklerdeki katkı oranları sönmüş kireç ve uçucu külden %10, asidik ve bazik karakterli tüflerde ise %5 ve %10 olacak şekilde iki katkılı örnekler hazırlanmıştır. Bu örneklerde gerçekleştirilen standard kompaksiyon deneylerinden elde edilen w_{opt} ve γ_{kmax} değerleri ve bu değerlerdeki değişim yüzdeleri Tablo 4'te verilmiştir.

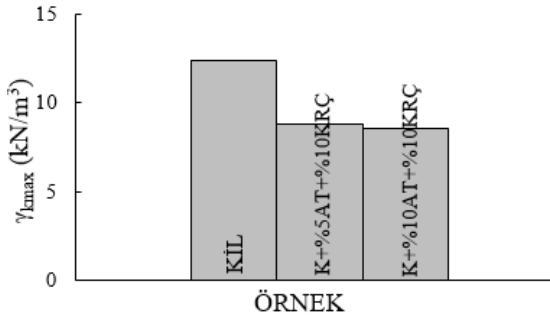
Tablo 4. İki katkı malzemesinin kullanıldığı örneklerin w_{opt} ve γ_{kmax} değerlerindeki % değişimler.

Örnek Adı	w_{opt} (%)	Değişim (%)	γ_{kmax} (kN/m ³)	Değişim (%)
K	38.50	-	12.36	-
K + % 5 AT + % 10 KRÇ	65.00	68.83	8.83	-28.56
K + % 10 AT + % 10 KRÇ	70.00	81.82	8.53	-30.99
K + % 5 BT + % 10 KRÇ	56.00	45.45	9.61	-22.25
K + % 10 BT + % 10 KRÇ	57.00	48.05	9.51	-23.06
K + % 5 AT + % 10 UK	56.00	45.45	9.91	-19.82
K + % 10 AT + % 10 UK	52.50	36.36	10.10	-18.28
K + % 5 BT + % 10 UK	54.00	40.26	9.71	-21.44
K + % 10 BT + % 10 UK	50.00	29.87	10.40	-15.86

İkinci aşamada gerçekleştirilen deneylerden elde edilen w_{opt} ve γ_{kmax} değerlerinde meydana gelen değişim yüzdelere göre %10 sönmüş kireç ile %5 ve %10 asidik ve bazik karakterli tüflerin katkı malzemesi olarak kullanıldığı örneklerde en iyi sonuç %10 asidik tuf + %10 sönmüş kirecin kullanıldığı örnekte meydana gelmiştir. %5 asidik tuf katkısının kullanıldığı örneğin w_{opt} değerindeki artış oranı %68.83 iken, asidik tuf katkı oranının %10'a çıkarılması durumunda w_{opt} değeri %70'e, artış oranı ise %81.82'ye ulaşmıştır. Bu gruptaki örneklerde asidik tuf katkısının %5 olması durumunda γ_{kmax} değerindeki azalma %28.56 iken katkı oranının %10 olması durumunda γ_{kmax} değerindeki azalma oranı %30.99 olmuş ve γ_{kmax} değeri 8.53 kN/m^3 'e düşmüştür (Tablo 4, Şekil 15, 16).

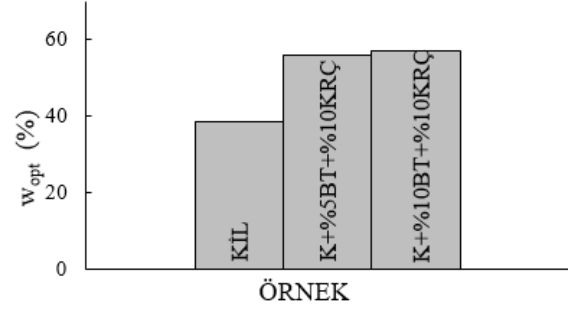


Şekil 15. Asidik tuf ve sönmüş kireç katkılı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

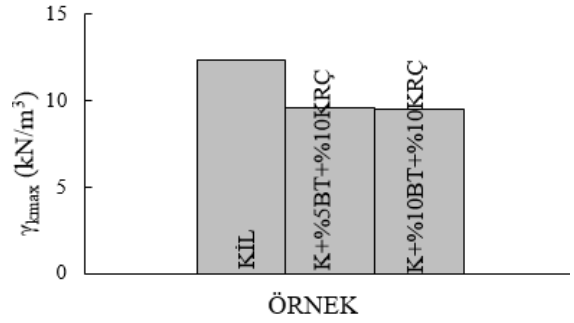


Şekil 16. Asidik tuf ve sönmüş kireç katkılı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Bazik karakterli tuf ile sönmüş kirecin birlikte kullanıldığı örneklerde ise en iyi sonuçlar %10 bazik tuf + %10 sönmüş kireç katkılı örnekte belirlenmiştir. Bazik tuf katkısının %5 olduğu örnekte w_{opt} değerindeki artış oranı %45.45 iken, bazik tuf katkısının %10 olması durumunda bu artış %48.05 olarak gerçekleşmiştir. Benzer şekilde γ_{kmax} değerlerindeki en fazla azalma oranı da %23.06 oranındaki bir azalma ile %10 bazik tuf + %10 sönmüş kireç katkılı örnekte meydana gelmiştir (Tablo 4, Şekil 17, 18).

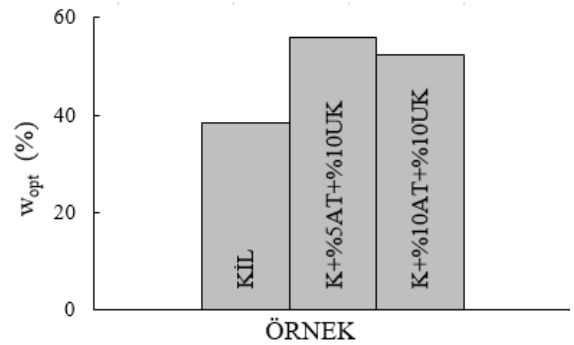


Şekil 17. Bazik tuf ve sönmüş kireç katkılı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

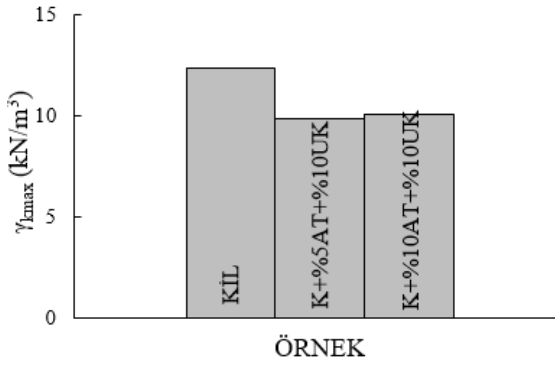


Şekil 18. Bazik tuf ve sönmüş kireç katkılı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Uçucu kül ile asidik tufün birlikte kullanıldığı örneklerde ise en iyi sonuç %5 asidik tuf + %10 uçucu kül katkılı örnekte belirlenmiştir. Bu örneğin w_{opt} değerindeki artış oranı %45.45 iken asidik tuf katkısının oranı %10 olduğunda w_{opt} değerindeki artış oranı %36.36'ya düşmektedir. Bu örneğin γ_{kmax} değerindeki azalma oranı ise %19.82'dir ve bu azalma oranı %10 sönmüş kireç + %10 asidik tuf katkılı örneğe göre daha fazladır (Tablo 4, Şekil 19, 20).

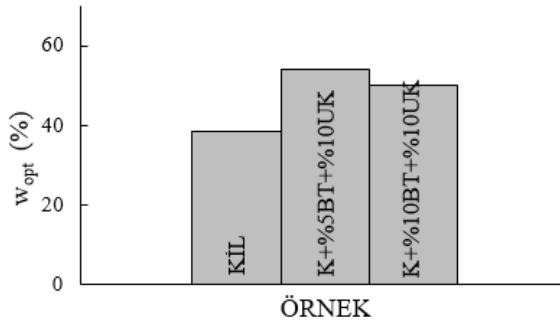


Şekil 19. Asidik tuf ve uçucu kül katkılı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

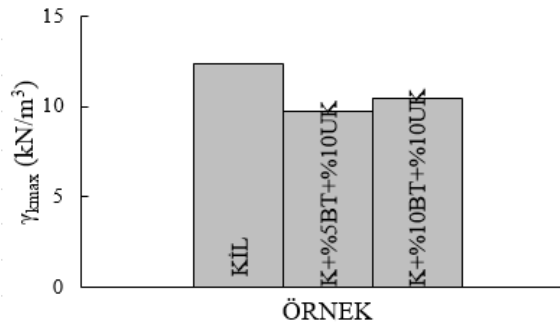


Şekil 20. Asidik tuf ve uçucu kül katkı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Bazik tüfler ile birlikte uçucu külün kullanıldığı örneklerde elde edilen en iyi sonuçlar % 5 bazik tuf + % 10 uçucu kül katkı örnekte belirlenmiştir. Bu örneğin w_{opt} değeri katkısız kile göre %40.26 artarak %54.00'e ulaşmıştır. Bazik tuf katkısının %10 olduğu örnekte ise w_{opt} değerindeki artış oranı %29.87'ye gerilemiştir. γ_{kmax} değerlerindeki azalmalar dikkate alındığında yine en iyi sonuç % 5 bazik tuf + % 10 uçucu kül katkı örneğe aittir. Bu örnekte γ_{kmax} değerindeki azalma oranı %21.44 iken bazik tuf katkısının %10'a artırılması ile γ_{kmax} değerindeki azalma %15.86'da kalmıştır (Tablo 4, Şekil 21, 22).



Şekil 21. Bazik tuf ve uçucu kül katkı örneklerin w_{opt} değerlerindeki değişimlere ait histogram.



Şekil 22. Bazik tuf ve uçucu kül katkı örneklerin γ_{kmax} değerlerindeki değişimlere ait histogram.

Yapılan deneysel çalışmalardan ortaya çıkan sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde; katkısız bentonit örneğine göre tek katkı örneklerin w_{opt} değerinde en büyük orandaki artış %24.68 ile %5 asidik tuf katkı örnekte, γ_{kmax} değerlerindeki en fazla azalma ise %16.67 oranı ile %10

sönmüş kireç katkı örnekte meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, %10 oranında sönmüş kireç ve %5 oranındaki asidik tuf katkısının önemli bir puzolanik etkiye sahip olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Çift katkı örneklerde ise hem w_{opt} hem de γ_{kmax} değerlerindeki olumlu değişimler % 10AT + %10 KRÇ katkı örnekte belirlenmiştir. Bu örneğin w_{opt} değeri katkısız bentonit örneğine göre %81.82 oranında artarak %70.00'e ulaşmıştır. Yine diğer katkı örneklerine göre γ_{kmax} değerlerindeki en fazla azalma bu örnekte meydana gelmiştir. Örneğin γ_{kmax} değeri katkısız bentonit örneğine göre %30.99 oranında azalarak 8.53 kN/m²'e inmiştir.

Stabilizasyon konusunda yapılan çalışmalarda stabilize edilen killi zeminlerde danelerin kümeler haline bir araya geldiği (topaklanma) ve zeminin mikro yapısının değiştiği, böylece zeminin boşluk oranı ve optimum su içeriği artarken, maksimum kuru birim hacminin ise azaldığı belirtilmektedir [8],[29],[51]-[53]. Bu değişimlerin meydana gelmesinde en önemli etken killi zemine katılan malzemenin etkisiyle gelişen puzolanik reaksiyonlardır. Puzolan olarak adlandırılan bu malzemeler ASTM C-618 [45] tarafından kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan, fakat uygun nem şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip ürünler açığa çıkaran, ince toz halindeki silisli veya silisli-alüminli maddeler olarak tanımlanmaktadır. Bu tanımda puzolanik reaksiyonun gelişebilmesinde en önemli faktörlerden birisinin ortamda kirecin bulunması gerekliliği belirtilmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar da bu bilgiyi desteklemektedir. Nitekim katkı malzemesi olarak sadece %10 sönmüş kireç veya %5 asidik tuf katkısının kullanıldığı örneklerde nispeten iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, bu iki katkı malzemesinin birlikte kullanılması durumunda elde edilen sonuç gerçekten çok dikkat çekicidir. Katkı olarak %5 asidik tuf ve %10 sönmüş kirecin birlikte kullanılması durumunda hem w_{opt} değerindeki artış, hem de γ_{kmax} değerindeki azalma maksimum düzeye ulaşmıştır. Çünkü puzolanik reaksiyonda CaO, SiO₂ ve Al₂O₃ oranları önemli bir yere sahiptir. Katkı olarak sadece sönmüş kirecin kullanılması durumunda daha iyi bir puzolanik reaksiyonun gelişebilmesi için ortamda yeterli miktarda SiO₂ ve Al₂O₃, katkı olarak sadece asidik tufün kullanılması durumunda ise CaO miktarı yeterli değildir. Bu iki katkı malzemesinin birlikte kullanılması durumunda, puzolanik reaksiyonun gelişebilmesi için gerekli olan CaO sönmüş kireç, SiO₂ ve Al₂O₃ ise asidik tuf tarafından karşılanmış ve böylece etkili bir puzolanik reaksiyon oluşmuştur. Bu reaksiyonun etkileri %5 asidik tuf ve %10 sönmüş kirecin kullanıldığı örneğe ait hem w_{opt} hem de γ_{kmax} değerlerinde meydana gelen değişimlerde görmek mümkündür.

4. Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca verilmiştir.

1. Çalışmada kullanılan kilin zemin sınıfı kıvam limiti deneylerine göre yüksek plastisiteli (CH) kil olarak belirlenmiştir. Kilin LL % 507, PL % 47 ve

- PI değeri ise % 466'dır. Standard proktor deneylerine göre katkısız kilin w_{opt} değeri % 38.5, γ_{kmax} değeri ise 12.36 kN/m³'dür.
2. Katkılı örneklerin w_{opt} değerleri %39-70 arasında, γ_{kmax} değerleri ise 8.53-11.57 kN/m³ arasında değişim göstermektedir.
 3. Sadece bir katkı malzemesinin kullanıldığı örneklerde en iyi sonuçlar %10 sönmüş kireç ve %5 asidik tuf katkılı örneklerde meydana gelmiştir. Katkı malzemesi olarak %5 asidik tufün kullanıldığı örnekte w_{opt} değeri katkısız bentonit örneğine göre yaklaşık %24 oranında artmış, %10 sönmüş kirecin kullanıldığı örneğin γ_{kmax} değeri ise yaklaşık %17 azalma göstermiştir.
 4. İki farklı katkı malzemesinin kullanıldığı örneklerden elde edilen sonuçlara göre %10 asidik tuf + %10 sönmüş kireç katkılı örnekte en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Nitekim bu örneğin w_{opt} değeri katkısız bentonit örneğine göre %81.82 oranında artarak %70.00, γ_{kmax} değeri ise katkısız bentonit örneğine göre %30.99 oranında azalarak 8.53 kN/m³ olmuştur.
 5. Bu sonuçlar, katkı malzemesi olarak en fazla tercih edilen sönmüş kirecin veya yine önemli bir puzolan olan asidik karakterli tufün tek başına kullanımı sonucunda stabilizasyonda olumlu sonuçlar elde edilmesine karşın, katkı malzemesi olarak %10 oranında sönmüş kireçle birlikte %5 oranında asidik tuf kullanımının elde edilecek sonuçlara çok büyük bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni ise sönmüş kirecin yüksek CaO oranına, asidik tufün ise yüksek SiO₂ ve Al₂O₃ oranlarına sahip olması ve bunun etkisiyle güçlü bir puzolanlık reaksiyon gelişmesidir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır"

Yazar Katkıları

Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU, Çalışma konsepti ve tasarım, Veri toplama, Taslağın oluşturulması, Verilerin analizi ve yorumlanması

Zülfü GÜROCAK, Çalışma konsepti ve tasarım, Veri toplama, Taslağın oluşturulması, Verilerin analizi ve yorumlanması

Teşekkür

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından MF.16.64 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] N.O. Attoh-Okine, "Lime treatment of laterite soils and gravels-revisited," *Constr. Build. Mater.*, vol. 9 no.5, pp. 283-287, 1995. doi.org/10.1016/0950-0618(95)00030-J.
- [2] J. Hilf, "Compacted fill. in: H. Fang (Ed.). Foundation Engineering Handbook," Van Nostrand Reinhold. NewYork ABD, 1991.
- [3] D. Little, "Stabilization of pavement subgrades base courses with lime," *Lime Association of Texas. ABD*, 1995.
- [4] F. Bell, "Lime stabilization of clay minerals and soils," *Eng. Geol.* vol. 42, no. 4, pp. 223-237, 1996, doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2.
- [5] D.I. et al., "Development of stabilization and solidification in lime-clay mixes," *Geotechnique*, vol. 51, no. 6, pp. 533-543, 2001, doi.org/10.1680/geot.2001.51.6.533.
- [6] A.J., Puppala et al., "Resilient moduli of treated clays from repeated load triaxial test," *Transportation Research Records: Journal of Transportation Research Board*, pp. 68-74:1821, 2003, doi.org/10.3141/1821-08.
- [7] E. Kalkan and S. Akbulut, "The positive effects of silica fume on the permeability swelling pressure and compressive strength of natural clay liners," *Eng. Geol.*, vol. 73, no. (1-2), pp. 145-156, 2004, doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.001.
- [8] J. Mallela, et al., "Consideration of limestabilized layers in mechanistic-empirical pavement design," *The National Lime Association*. Arlington. Virginia, USA, 2004.
- [9] A.A. Al-Rawas, A.W. Hugo and H. Al-Sami, "Effect of lime, cement and artificial pozzolan on the swelling potential of an expansive soil from Oman," *Building & Environment* 40. Elsevier; pp.267-281, 2005, doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.028.
- [10] H.S. Aksoy, M. Yılmaz, E.E. Akarsu, "Killi bir zeminin Tunçbilek uçucu külü kullanılarak stabilizasyonu". *Doğu Anadolu Bölgeleri Araştırmaları*, 2008.
- [11] O. Cuisinier et al., "Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil," *Eng. Geol.*, vol. 123, no. 3, pp. 187-193, 2011, doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.07.010.
- [12] K, Harichane et al., "Effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des sols argileux" *Proceedings of 29th meeting of AUGC-Tlemcen*, Algeria, 2011.
- [13] K.M.A. Hossain, L.Mol, "Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 8,

- pp. 3495-3501, 2011, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.042.
- [14] T. Ramadas, N.D. Kumar and G. Yesuratnam, "Geotechnical characteristics of three expansive soils treated with lime and fly ash," *Int. J. Earth Sci. Eng.*, vol. 4, pp. 46-49, 2011.
- [15] O. Azadegan, S.H. Jafari, J. Li, "Compaction characteristics and mechanical properties of lime/cement treated granular soils," *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 17, pp. 2275-2284, 2012.
- [16] B. Lin et al., "Effect of fly ash on the behavior of expansive soils: microscopic analysis" *Environmental Engineering Geoscience*, vol. 19, no. 1, pp. 85-94, 2013, doi.org/10.2113/gseegeosci.19.1.85.
- [17] A. Mahamedi and M. Khemissa, "Cement stabilization of compacted expansive clay," *Online j. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 33-38, 2013.
- [18] D. Wang et al., "Effect of lime treatment on geotechnical properties of Dunkirk Sediments in France," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14, no. 3, pp. 485-503, 2013, doi.org/10.1080/14680629.2012.755935
- [19] P. Voottipruex and P. Jamsawang, "Characteristics of expansive soils improved with cement and fly ash in Northern Thailand," *Geomechanics and Engineering An Int'l Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 437-453, 2014, DOI: 10.12989/gae.2014.6.5.437.
- [20] M.R. Asgari, A.B. Dezfuli and M. Bayat, "Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with Cement/lime," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 8, no. 3, pp. 1439-1452, 2015, doi.org/10.1007/s12517-013-1173-1
- [21] A.R. Goodarzi, S.H. Goodarzi, H.R., "Akbari, Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste," *Iranian Journal of Science And Technology-Transactions of Civil Engineering*, vol. 39, no. C2, pp. 333-350, 2015, doi.org/10.22099/IJSTC.2015.3138.
- [22] M. Gör, H.S. Aksoy, G. Bilgen, "Farklı katkı malzemelerinin kil bir zeminin kıvam limitleri üzerinde zamana bağlı etkisi" *15. Ulusal Kil Sempozyumu*, Niğde, 2012
- [23] A. Kavak, M.M. Kızılcelik and G. Bilgen, "Stabilization of high plasticity clay with quick and hydrated lime", *XV Danube - European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE)*, Vienna, 2014.
- [24] G. Yang et al., "Geogrid-reinforced lime-treated cohesive soil retaining wall: Case study and implications" *Geotext. Geomembranes*, vol 35, pp. 112-118, 2012, doi.org/10.1016/j.geotextmem.2012.09.001.
- [25] S.Y. Chong and K.A. Kassim, "Consolidation characteristics of lime column and geotextile encapsulated lime column (GELC) stabilized pontian marine clay," *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 19A, pp. 129-141, 2014.
- [26] J. Locat, M.A. Berube and M. Choquette, "Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: Shear strength development" *Can. Geotech. J.*, vol. 27, no. 3, pp.294-304, 1990, doi.org/10.1139/t90-040.
- [27] S. Wild et al., "Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength and swelling properties of lime-stabilized kaolinite in the presence of sulphates," *Clay Miner.*, vol. 31, no. 3, pp. 423-433, 1996, DOI: 10.1180/claymin.1996.031.3.12.
- [28] C.M. Geiman, "Stabilization of soft clay subgrades in Virginia phase I laboratory study," MS Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [29] J.M. Kinuthia, S. Wild and G.I. Jones, "Effects of monovalent and divalent metal sulphates on consistency and compaction of lime-stabilised kaolinite," *Appl. Clay Sci.*, vol. 14, no. 1-3, pp. 27-45, 1999, doi.org/10.1016/S0169-1317(98)00046-5.
- [30] M. Imbabi, C. Carrigan, S. McKenna, "Trends and developments in green cement and concrete technology," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 1, no. 2, pp. 194-216, 2012, doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001.
- [31] S.N. Keskin and Ö. Çimen, "Killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde pomza kullanımının araştırılması," *I. Isparta Pomza Sempozyumu*, pp. 97-101, 1997.
- [32] A. Okucu, "Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri," Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 1998.
- [33] S. Fındık, "Karayolu esnek üstyapıları alttemel tabakasının stabilizasyonunda hafif agregaların kullanılabilirliği," Yüksek Lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2005.
- [34] Ü. Bulut, "Perlitin Puzolanik Aktivitesi," Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2007.
- [35] Y. Kavlak, "Isparta Gelincik pomzasının karayolu esnek üstyapıları taban zemini stabilizasyonunda kullanımı," Yüksek Lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2008.
- [36] A. Akbulut, "Bentonit," MTA Eğitim Serisi-32, Ankara, 1996.
- [37] Y. Önem, "Sanayi Madenleri," Kozan Ofset, Ankara, 2000.
- [38] S. Genç, "Şişen Zeminler ve Bentonit-kaolin karışımlarının şişme özellikleri," Yüksek lisans tezi. İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [39] K. Özaydın, "Zemin Mekaniği", Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000.

- [40] Y. Aslan Topçuoğlu, “Farklı katkı maddelerinin zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi,” Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2020.
- [41] Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 197-1, 2012.
- [42] M. Çakır, “Uçucu kül ile zemin stabilizasyonu. Yüksek lisans tezi,” İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1999.
- [43] D. Alkaya, “Uçucu kül katkısının dolgu zeminlerin stabilitesine etkisi”, Doktora tezi, Pamukkale Üniversitesi, 2002.
- [44] H. Toros, “Afşin Elbistan Termik santrali uçucu küllerinin yapı malzemesi olarak kullanılması. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi; İstanbul, 1987.
- [45] Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Society for Testing and Materials, ASTM C 618-12, 2012.
- [46] A. Atterberg, “Über die Physikalische bodenuntersuchung, and über die plastizität der tone, internationale mittlungen für bodenkunde”, C.1, pp. 10-43, Berlin, 1911.
- [47] A. Casagrande, “Research on the Atterberg limits of soils,” *Pub. Roads*, C.13, pp. 121-136, 1932.
- [48] I.L. “Whyte Soil plasticity and strength-A new approach for using extrusion,” *Ground Engineering*, no.15, pp. 16-24, 1982.
- [49] Standard Test Methods for Liquid Limit. Plastic Limit and Plasticity Index of Soils. American Society for Testing and Materials, ASTM D4318-17e1, 2017.
- [50] Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, American Society for Testing and Materials ASTM D698- 12e2, 2012.
- [51] I.T. Jawad *et al.*, “Soil stabilization using lime: advantages, disadvantages and proposing a potential plternative”, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 8, no. 4, 510–520, 2014, doi.org/10.19026/rjaset.8.1000 .
- [52] A.M. Tabatabai, “Pavement,” University’s Publication Center, Tehran, Iran, 1997.
- [53] M.R. Thompson, “Engineering properties of limesoil mixtures”, *Journal of Materials*, vol. 4, no. 4, pp. 968-969, 1969.



Influence Surface Coefficients of Plates Resting on Pasternak Foundation

Ülkü Hülya ÇALIK-KARAKÖSE*

Istanbul Technical University, Civil Engineering Department, calikkarakose@itu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-2944-7434

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 April 2022
Received in revised form 1 May 2022
Accepted 18 Haziran 2022
Available online June 2022

Keywords:

influence surface, Betti's law, Müller-Breslau principle, plate finite element, Pasternak foundation
(List three to six pertinent keywords specific to the article)

Doi: 10.24012/dumf.1101167

* Corresponding author

ABSTRACT

In this study, internal force influence surface coefficients of plates resting on Pasternak foundation are obtained by the finite element method applying the classical Müller-Breslau Principle. The two-parameter elastic foundation is represented straightforwardly by the inclusion of the elastic bedding and shear parameter matrix terms of a 4-noded soil finite element to the corresponding stiffness matrix terms of the plate finite element used in the implementation. Using this approach, the influence surface coefficients are easily and directly obtained through the finite element analysis of the plate-foundation system using the loading vectors derived from the element matrices of the finite elements used. Internal force influence surface coefficients of plates with and without elastic foundation are given comparatively through numerical examples, verifying the values with another approach and the literature.

Introduction

An influence line or surface function of a particular point on a structure is the variation of any designated effect like displacements and internal forces due to a unit loading moving on the structure. These functions are of great importance when the structures are subjected to live loads since they are required when extremum displacement and internal force values at particular points of the structures due to live loads are to be determined.

Influence lines and surfaces can be obtained using three main approaches which are the equilibrium method, the Müller-Breslau principle and the adjoint method. The equilibrium method is the simplest method where the structure is analysed for different locations of the unit loading in order to obtain the influence functions. However, high computational cost arises in this method since the analyses are repeated many times. A more efficient approach, the Müller-Breslau principle [1-3] which is based on the principle of virtual work states that the influence function of any designated effect on a structure is proportional to the deformed shape of the structure obtained by applying a known displacement in the direction of the designated effect [4,5]. In the adjoint method proposed by [6,7], an adjoint variable vector for

any designated effect function is calculated using the adjoint equations and influence line ordinates are obtained via the equilibrium equations. A remedy is proposed by [8] for the deficiency of the adjoint method which is the necessity of a correction to the adjoint variable vector for the designated effect function in the directions of the constrained degrees of freedom. In both of these methods, the analysis is performed only once which significantly reduces the computation time. In [9], finite element implementation of the three main approaches used for the determination of influence surfaces for internal forces is carried out.

Analysis of plates resting on elastic foundations are widely performed for the shallow reinforced concrete foundations [10] of various types of buildings. Extremum internal forces of these foundations due to live loads can be obtained via influence surface coefficients. In this paper, a MATLAB code is written for the determination of internal force influence surface coefficients of plates resting on two-parameter elastic foundations using the approach proposed by [2] which is based on the finite element implementation of the classical Müller-Breslau Principle. According to this approach, the element loading matrices used to determine the influence surfaces of plates are obtained using the Betti's law and the governing

equations of the finite element method. The elastic foundation is represented by adding the terms of elastic bedding and shear parameter matrices of a soil finite element derived by [11] to the plate element stiffness matrix terms corresponding to deflections.

Kirchhoff Plate Finite Element and Inclusion of Foundation Parameters

The finite element used in the implementation is a popular 4-noded non-conforming 12 degree of freedom rectangular plate finite element, Figure 1, developed by Melosh [12] and Zienkiewicz and Cheung [13,14], and its formulation is based on the well-known Kirchhoff plate theory.

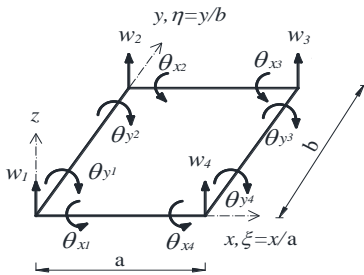


Figure 1. Plate bending element

The displacement vector and the rotations of the element are

$$\{d\} = \{w \quad \theta_x \quad \theta_y\}^T, \quad \theta_x = \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \theta_y = -\frac{\partial w}{\partial x} \quad (1)$$

The displacement function of the finite element is

$$w = \{1 \quad \xi \quad \eta \quad \xi^2 \quad \xi\eta \quad \eta^2 \quad \xi^3 \quad \xi^2\eta \quad \xi\eta^2 \quad \eta^3 \quad \xi^3\eta \quad \xi\eta^3\} \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

where c_1, c_2, \dots, c_{12} are arbitrary constants. It can also be expressed in terms of nodal unknowns as

$$w = \sum_{i=1}^{12} N_i d_i \quad (3)$$

Here, N_i are C^1 continuous shape functions used to obtain the unknown nodal displacement components.

The stiffness matrix of the element is obtained using

$$K = \int_A B^T D B dA \quad (4)$$

Here, $[B] = [\partial][N]$ where

$$[\partial] = \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

The elasticity matrix for the isotropic material is defined as

$$[D] = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

where E is the Young's modulus, h is the plate thickness and ν is the Poisson's ratio.

$[C]$ and $[C_T]$ elastic bedding and shear parameter matrices to be included in the plate finite element stiffness matrix are derived by [11] where C_{ij} and C_{Tij} matrix terms are obtained using

$$C_{ij} = k_w \int_A w_i w_j dA \quad (7)$$

$$C_{Tij} = k_p \int_A \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} dA \quad (8)$$

Here, k_w and k_p are the coefficient of subgrade reaction and the shear modulus of the foundation, respectively and the elastic bedding and shear parameter matrices are

$$[C] = \frac{k_w ab}{36} \begin{bmatrix} 4 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

and

$$[C_T] = \frac{k_p}{3} \begin{bmatrix} \alpha + \beta & \alpha/2 - \beta & \beta/2 - \alpha & -(\alpha + \beta)/2 \\ \alpha/2 - \beta & \alpha + \beta & -(\alpha + \beta)/2 & \beta/2 - \alpha \\ \beta/2 - \alpha & -(\alpha + \beta)/2 & \alpha + \beta & \alpha/2 - \beta \\ -(\alpha + \beta)/2 & \beta/2 - \alpha & \alpha/2 - \beta & \alpha + \beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

where $\alpha = a/b$ and $\beta = b/a$

Influence Surface Coefficients for Stress Components

In a linear elastic 2D structure discretized into finite elements, displacement ordinates due to a unit loading in the direction of any displacement component give the influence surface coefficients of that displacement component according to the Betti's law. The influence coefficients of all nodal displacement components of an element can be obtained via

$$SU = Q \quad (11)$$

where S is the system stiffness matrix, U is a matrix consisting of influence coefficients of nodal displacement components and Q is the system loading matrix consisting of loading vectors with unit values in the directions of the nodal displacement components of the element in question while the rest of the vector elements are zero.

Using the governing equations of the finite element method, the influence coefficients of stress components at a particular point of an element can be obtained via

$$\sigma = DBU \quad (12)$$

Defining the element stress matrix as

$$G = DB \tag{13}$$

and substituting into Eq.(12), it yields

$$\sigma = GU \tag{14}$$

or

$$\sigma^T = UG^T \tag{15}$$

Multiplying both sides of Eq. (11) by G^T ,

$$SUG^T = G^T \tag{16}$$

is obtained where G^T is taken as the element loading matrix. Substituting the element loading matrices into the global lading matrix Q and solving the linear simultaneous equations, σ^T is obtained giving the influence surface coefficients of stress components for any point in the system. If the influence surface coefficients of any stress component are to be calculated, the column of matrix G^T corresponding to the stress component in question is taken as the element loading vector which is denoted as r.

Computer Implementation

A MATLAB code is written to determine the influence surface coefficients for the stress components of any point on plates resting on Pasternak foundation. The procedure is as follows:

1. Stiffness matrix of the 12 degree-of-freedom plate finite element is constructed. $[C]$ and $[C_T]$ foundation parameter matrix terms are added to the relevant stiffness matrix terms of the element. For foundation extensions, stiffness matrix row and column terms of these elements corresponding to rotations are eliminated and foundation parameter matrix terms are assigned as the stiffness matrix terms corresponding to deflections.

2. System stiffness matrix is constructed.
3. The local coordinates of the node of which the influence surface coefficients are to be determined are defined for the connected 4 elements and the element stress vectors for the required stress component are obtained.
4. Average values of these stress vectors are assigned as the global loading vector terms.
5. Static analysis of the system is performed and the displacement vector is obtained where the deflection values correspond to the influence surface coefficients for the stress component of the node in question.

Benchmark Examples

Example 1

A benchmark example taken from the literature [15,16] is solved in order to verify the plate-foundation model. The example is a simply supported homogeneous square plate resting on an isotropic Pasternak foundation and is subjected to a uniformly distributed load of $q_0=E/10^5$ kN/m². Length to height ratio of the plate is $a/h=100$ and the Poisson's ratio is $\nu=0.3$. Dimensionless central deflections are obtained for constant coefficient of subgrade reaction and increasing shear moduli values and compared with the reference solutions as given in Table 1.

Note that K_w and K_p are dimensionless coefficient of subgrade reaction and shear modulus, respectively. $K_w = k_w a^4 / D$ and $K_p = k_p a^2 / D$ where $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$.

It is observed that the deflections obtained in this study are very close to the reference values and decrease with increasing shear modulus as expected.

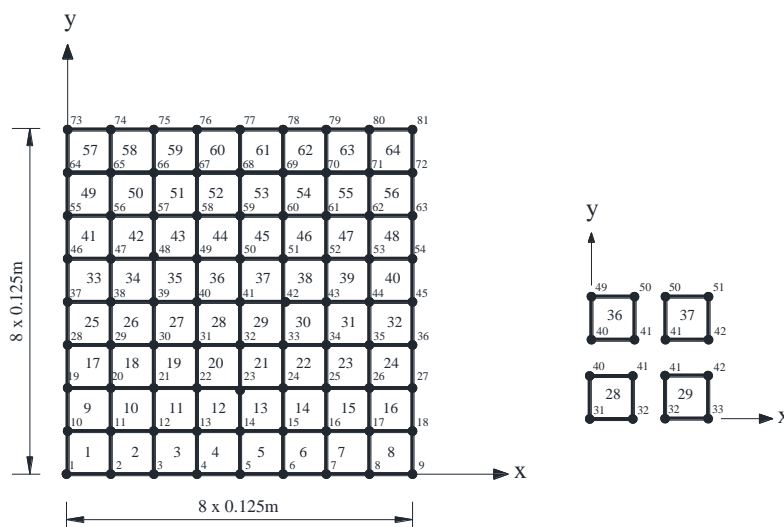


Figure 2. Finite element mesh of the plate

Table 1. Dimensionless central deflections of a uniformly loaded square plate resting on Pasternak foundation

K _w	K _p	Dimensionless central deflection (w'= 10 ³ D w / qa ⁴)		
		present	[16]	[15]
1	1	3.8517	3.8546	3.8530
1	81	0.7637	0.7630	0.7630
1	625	0.1154	0.1153	0.1150

Example 2

The finite element mesh of a simply supported square plate solved by [2] is given in Figure 2. The thickness of the plate is t=1m, the Young’s modulus is E=10.92 kN/m² and the Poisson’s ratio is ν=0.3. First, bending moment (M_x) influence surface coefficients for the central node (node 41) are obtained using the present approach and compared with the reference solution, [2] and the values obtained by SAP2000 software package in order to verify the present implementation.

The loading vectors which are the column vectors of the element stress matrices corresponding to M_x (1st columns) belong to the connecting elements of node 41 (elements 28, 29, 36 and 37). ¼ of each element loading vector is used since the average M_x stress is taken into account and these vectors are given in Table 2 also verified with the values provided by [2]. Substituting these element loading vectors into the system loading vector and solving the plate, the influence surface coefficients for the central node (node 41) are obtained at once.

In SAP2000, the system model is solved for a unit vertical load applied to the selected nodes separately and M_x moment values at the central node corresponding to M_x influence surface coefficients are obtained. This operation is time consuming since the analysis is repeated for each location of the unit load.

It is observed that the coefficients for the selected nodes are very close to the reference values, Table 3. The slight differences may be due to the different finite elements used in the implementation. Twisting moment (M_{xy}) influence surface coefficients for the midpoint of the plate at some selected nodes are also obtained in addition to M_x coefficients and checked with the values obtained by SAP2000, Table 4. Note that the loading vectors for M_{xy} are the column vectors of the connecting element stress matrices which correspond to M_{xy} (3rd columns).

Table 2. Loading vectors for M_x influence surface coefficients for node 41.

freedom	r ²⁸	r ²⁹	r ³⁶	r ³⁷
1	0.0	-115.2	-384.0	499.2
2	0.0	-4.8	0.0	9.6
3	0.0	0.0	16.0	-32.0
4	-384.0	499.2	0.0	-115.2
5	0.0	-9.6	0.0	4.8
6	16.0	-32.0	0.0	0.0
7	499.2	-384.0	-115.2	0.0
8	-9.6	0.0	4.8	0.0
9	32.0	-16.0	0.0	0.0
10	-115.2	0.0	499.2	-384.0
11	-4.8	0.0	9.6	0.0
12	0.0	0.0	32.0	-16.0

Table 3. Nodal Influence Surface Coefficients for M_x

Node Number	Influence surface coefficient for M _x		
	present	[11]	SAP2000
11	0.011273	0.010770	0.011536
21	0.046316	0.044470	0.047332
31	0.121609	0.116450	0.124347
39	0.058019	0.057770	0.058426
41	0.366410	0.346090	0.375326

Then, a two-parameter elastic foundation is added to the square plate and M_x influence surface coefficients for node 41 are obtained for constant coefficient of subgrade reaction and increasing shear modulus and given comparatively in Table 5. It is seen that the influence surface coefficients at the selected nodes decrease as the shear modulus increases.

In order to verify the results, the system model is also created in SAP2000 using the procedure given in [17]. The two-parameter elastic foundation is modelled using “shell” element where the section type is selected as “Plane-Strain” and the thickness of the section is assigned to a unit value. The elastic moduli and Poisson’s ratios in all directions are set to zero values and the in-plane shear moduli (G₁₃ and G₂₃) are assigned to the shear moduli of the foundation. Thus, shear stresses in the thickness direction and vertical end forces occur only. The first parameter of the Pasternak foundation is represented by “area springs” assigned to the surface of the foundation. The deflections of the plate and the foundation nodes are equalised in order to provide the connection between the plate and the foundation, [17]. It is seen that the results obtained are close to each other, Table 6.

Table 4. Nodal influence surface coefficients for M_{xy}

Node Number	Influence surface coefficient for M_{xy}	
	present	SAP2000
11	-0.005105	-0.005262
17	0.005105	0.005262
21	-0.016096	-0.016459
25	0.016096	0.016459
31	-0.026572	-0.026646
33	0.026572	0.026646
39	0.000000	0.000000
41	0.000000	0.000000
49	0.026572	0.026646
51	-0.026572	-0.026646
57	0.016096	0.016459
61	-0.016096	-0.016459
65	0.005105	0.005262
71	-0.005105	-0.005262

Table 5. Nodal M_x Influence Surface Coefficients for different soil parameters

Node Number	Influence surface coefficients for M_x		
	No Foundation	$K_w=1$ $K_p=1$	$K_w=1$ $K_p=625$
11	0.011273	0.005873	0.000004
21	0.046316	0.026425	0.000054
31	0.121609	0.082964	0.001179
39	0.058019	0.029468	0.001283
41	0.366410	0.314923	0.019719

Table 6. Nodal M_x Influence Surface Coefficients for different soil parameters

Node Number	Influence surface coefficients for M_x			
	$K_w=1$	$K_p=1$	$K_w=1$	$K_p=625$
	present	SAP2000	present	SAP2000
11	0.005873	0.006043	0.000004	0.000002
21	0.026425	0.027149	0.000054	0.000061
31	0.082964	0.085161	0.001179	0.001192
39	0.029468	0.029610	0.001283	0.001439
41	0.314923	0.322896	0.019719	0.019542

Example 3

Plan and vertical section views of a rectangular plate resting on a two-parameter elastic foundation solved by [11] is given in Figure 3. The foundation has extensions in all directions and no boundary conditions are assigned to the plate edges which is a more realistic approach. First, the system is solved under the given distributed load for different soil parameters and midpoint deflections are compared with the values given in reference [11] in order to verify the present model. It is observed that the deflection values are very close to each other as given in Table 7. It is also seen that the results are very close to those obtained in an earlier study where the finite difference method is used in the system analysis, [18].

Then, M_x influence surface coefficients for the midpoint at some selected nodes shown in Fig. 4 are obtained for the given soil parameters and verified with the coefficients obtained by SAP2000, Table 8.

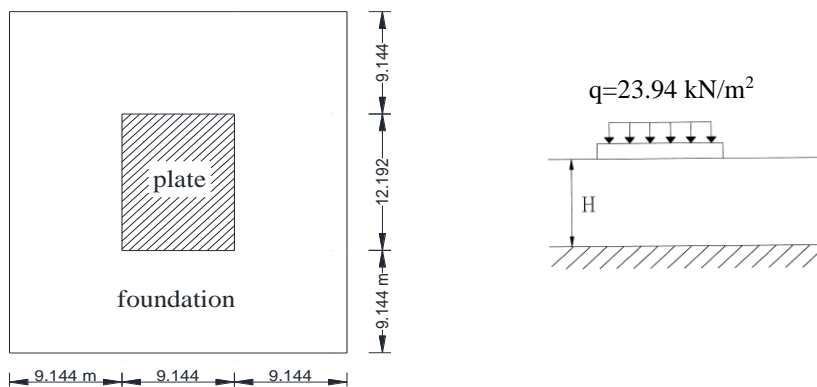


Figure 3. Plan and vertical section of the plate-foundation system

Table 7. Central deflections for different soil parameters

k_w	k_p	Central deflection (m)	
		present	[11]
27192	26826	0.000878	0.000853
13757	50410	0.001500	0.001526
9377	70586	0.001900	0.001893
5964	104664	0.002200	0.002212

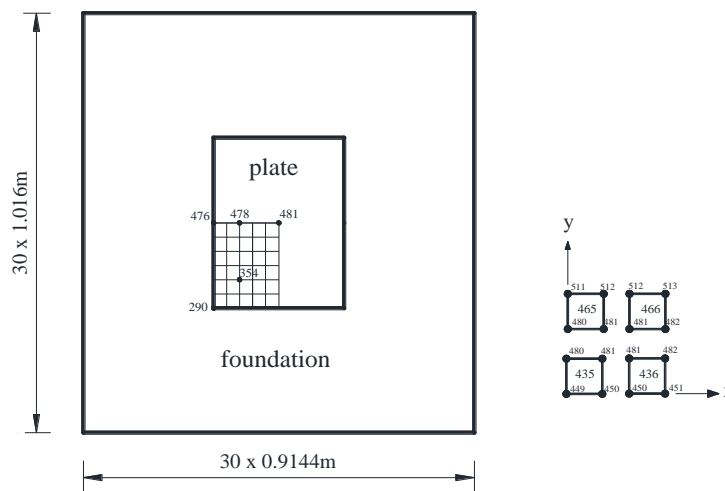


Figure 4. Finite element mesh of the plate-foundation system

Table 8. M_x Influence Surface Coefficients for different soil parameters

Node Number	Influence surface coefficients for M_x							
	$k_w=27192$ $k_p=26826$		$k_w=13757$ $k_p=50410$		$k_w=9377$ $k_p=70586$		$k_w=5964$ $k_p=104664$	
	present	SAP2000	present	SAP2000	present	SAP2000	present	SAP2000
290	-0.000002	-0.000003	-0.000032	-0.000025	-0.000042	-0.000031	-0.000036	-0.000020
354	-0.000059	-0.000063	-0.000110	-0.000091	-0.000075	-0.000052	-0.000021	-0.000035
476	-0.000106	-0.000196	-0.000486	-0.000506	-0.000500	-0.000503	-0.000403	-0.000328
478	-0.002412	-0.002304	-0.001977	-0.002064	-0.001532	-0.001684	-0.001122	-0.001275
481	0.122743	0.111566	0.101862	0.094453	0.088089	0.081619	0.071632	0.064130

Conclusions

In this paper, internal force influence surface coefficients required for the extremum internal force values due to live loads are obtained for the plates resting on Pasternak foundation. It is demonstrated that the two-parameter elastic foundation can be accounted for by adding the elastic bedding and shear parameter matrices of a soil element to the stiffness matrix terms of the plate element corresponding to the deflection freedom which is a straightforward procedure. The approach for the determination of influence surface coefficients of plates proposed in the literature is adapted to the plates on two-parameter foundations. Compared with the classical techniques, the influence surface coefficients are easily and directly obtained with this approach through the finite element analysis of the plate-foundation system using the loading vectors derived from the element matrices obtained by the governing equations and the Betti's law. No modifications to the input data of the systems discretised by different types of finite elements are required since the loading vectors are derived from the element matrices of the finite elements used in the implementation. Besides, the values within the elements can easily be obtained by using the nodal values of the influence surface coefficients and the element shape functions. The obtained results show good agreement with the reference values and it is demonstrated that the aforementioned approach is also very suitable for the plates on two-parameter elastic foundations since the plate-foundation system is solved only once to obtain the influence surface coefficients for the stress component at a particular point.

Acknowledgement

Prof. Dr. Engin Orakdöğen is gratefully acknowledged for his fruitful suggestions on this study.

References

- [1] A. Cifuentes, M. Paz, "A note on the determination of influence lines and surfaces using finite elements", *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 7, pp. 299-305, 1991.
- [2] E. Orakdöğen, K. Girgin, "Direct determination of influence lines and surfaces by F.E.M.", *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 20, no. 3, pp. 279-292, 2005.
- [3] W. Shen, "The generalized Müller-Breslau principle for higher-order elements", *Computers & Structures*, vol. 44, pp. 207-212, 1992.
- [4] A. Ghali, A.M. Neville, *Structural Analysis*, Chapman and Hall, London, 1978.
- [5] T.M. Charlton, "The principle of virtual work in relation to Müller-Breslau's principle", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 22, no. 2, pp. 523-525, 1980.
- [6] A.D. Belegundu, "Interpreting adjoint equations in structural optimization", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, vol. 112, no. 8, pp. 1971-1976, 1986.
- [7] A.D. Belegundu, "The adjoint method for determining influence lines", *Computers & Structures*, vol. 29, no. 2, pp. 345-350, 1988.
- [8] A.M. Memari, H.H. West, "Computation of bridge design forces from influence surfaces", *Computers & Structures*, vol. 38, pp. 547-556, 1991.
- [9] A. Albuquerque, V.G. Haach, R.R. Paccola, "Dependency of modeling parameters for the construction of influence surfaces by the finite element method", *Engineering with Computers*, vol. 34, pp. 143-154, 2018.
- [10] A. Trupia, A. Saygun, "Shallow reinforced concrete foundations", *Nobel Publication, Ankara (in Turkish)*, 2009.
- [11] M. Çelik, A. Saygun, "A method for the analysis of plates on a two-parameter foundation", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 36, pp. 2891-2915, 1999.
- [12] R.J. Melosh, "Structural analysis of solids", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, vol. 4, pp. 205-223, 1963.
- [13] O.C. Zienkiewicz, Y.K. Cheung, "The finite element method for analysis of elastic isotropic and orthotropic slabs", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 28, pp. 471-88, 1964.
- [14] O.C. Zienkiewicz, Y.K. Cheung, "Finite element procedures in the solution of plate and shell problems in stress analysis", Chapter 8. John Wiley & Sons, Chichester, 1965.
- [15] K.Y. Lam, C.M. Wang, X.Q. He, "Canonical exact solutions for Levy-plates on two parameter foundation using Green's functions", *Engineering Structures*, vol. 22, no. 4, pp. 364-378, 2000.
- [16] Z.Y. Huang, C.F. Lü, W.Q. Chen, "Benchmark solutions for functionally graded thick plates resting on Winkler-Pasternak elastic foundations", *Composite Structures*, vol. 85, pp. 95-104, 2008.
- [17] Ü.H. Çalık Karaköse, "FE Analysis of FGM Plates on Arbitrarily Orthotropic Pasternak Foundations for Membrane Effects", *Teknik Dergi*, vol. 33, no. 2, pp. 11799-11822, 2022.
- [18] C.V.G. Vallabhan, W.T. Straughan, Y.C. Das, "Refined model for analysis of plates on elastic foundation", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 117, no.12, pp. 2830-2844, 1991.



Proactive prevention model to manage construction time delays in developing countries

Ibrahim Salwan Majeed CHENENA¹, Gökhan KAZAR²*

¹ Istanbul Gedik University, Engineering Management Graduate Program, eng.salwan.79@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-2088-8794

² Istanbul Gedik University, Civil Engineering Department, gokhan.kazar@gedik.edu.tr, Orcid No 0000-0002-8616-799X

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 May 2022
Received in revised form 7 June 2022
Accepted 7 June 2022
Available online 28 June 2022

Keywords:

Construction management,
schedule overrun, proactive
prevention model

Doi: 10.24012/dumf.1114399

* Corresponding author

ABSTRACT

Due to the complex structure of construction activities, schedule overruns are inevitable in the construction industry. Particularly, construction projects play a key role in the economic conditions of developing countries. Although several studies have mainly focused on the time delay factors in the construction projects, a study does not exist on providing reliable and applicable solutions based on the eye of expert view. Thus, this study attempts not only to identify the major delay factors but also to introduce a proactive prevention model including long-term strategies and immediate practical solutions to be implemented in the construction industry of developing countries. For this purpose, a survey was conducted with 140 experts in the construction sector of a developing country, Iraq. Importance Index (Imp. I) based on the frequency and severity value of each time delay attribute and Relative Importance Index (RII) for suggestions and proactive steps were calculated according to survey results. After identifying major causal factors, strategies, and practical implementations, we developed a proactive prevention model to be utilized in the construction industry. The proposed model includes different practical implementations ongoing construction projects such as developing an Artificial Intelligence (AI)-based predictive model, using Time Series Analysis (TSA) approach, urgent practical applications, and long term strategies for construction companies to reduce time overruns in construction projects. To realize this kind of proactive prevention model in the construction industry, a data collection and sharing system including all related information recorded in diverse construction projects is highly recommended.

Introduction

Construction projects play an important role especially in the economics of developing and underdeveloped countries. One of the critical success factors for these construction works is delivering the project within the time as well as the commitment with allocated budget and high quality [1]. However, time delays in the construction industry are still a great issue and have become the nature of the construction projects. It is highlighted that time overruns in construction projects could cause multiple issues such as loss in productivity and quality, cost increase, disputes between stakeholders, and termination in contracts [2]. It is also stated that such time overruns influence the investment decisions for construction projects [3]. In general, project performance and value of the construction projects have weakened because of the time delays. Although the time delays have been seriously taken into consideration in the construction industry, it is still not possible to avoid extending the project deadlines. The government of Iraq which is one of the developing countries after the 2003 war has allocated 21.1% of the total budget for infrastructure investments [4]. However, the construction projects in Iraq have also extensively suffered from schedule and cost overruns. Since most

construction projects have been usually extended in Iraq, a number of studies have focused on understanding the root cause factors of time delays [5–7]. Diverse contributing factors related to schedule overruns such as contractor failure, bureaucracy, security issues, lack of experience, delays in payments, and changes in political and economic conditions and, changes in laws consistently were found the main reasons behind the deadline extensions in Iraqi construction projects [6]. Most of these studies have also suggested general and theoretical measurements for time-delay issues in construction projects. However, a study does not exist that provides a practical solution including urgent proactive steps and long-term strategies against these factors to prevent or reduce time delay issues in the eye of experts. Therefore, the main objective of this study is not only to identify the main causal factors regarding schedule overruns but also to introduce a proactive prevention model including immediate practical implementations and long-term suggestions for the construction industry of developing countries based on the expert opinions.

Background

Time Delay Factors in Construction

Because the construction industry plays a dynamic role in economic growth, the project performances in construction directly influence the financial conditions of countries. Moreover, the quality of physical assets such as infrastructure and residential ones are highly related to project performance during the construction process [8]. Takim and Akintoye (2002) assessed the key performance indicators of construction projects and identified time, quality, and cost as the most important triangle factors to evaluate the success degree of these projects. Also, it is highlighted that there is a strong interaction between those factors and it is not possible to separate them from each other during the construction phases [10]. Time overrun is one of the most commonly observed issues during construction projects, which is defined as a situation when the project is completed beyond the planned time [7].

Such schedule delays are the primary problems encountered in construction projects all over the world. However, construction projects have gained great importance due to providing a huge amount of financial circulation in developing countries compared to developed ones [11]. In this sense, several studies attempted to identify root causes of time delays particularly in developing countries such as in Africa (e.g., Burkina Faso [12], Nigeria [13], Ghana [14]) and in Asia (e.g., United Arab Emirates [15], Turkey [16], Iran [17], Saudi Arabia [18, 19], Malaysia [20], and India [21]).

Bagaya and Song (2016) carried out a study to investigate major time delay factors observed in the construction industry of Burkina Faso. The authors [12] conducted a survey with 140 construction experts and found the low financial capacity of contractors and owners, delays in cash flows and, lack of equipment are the most common reasons for time delays in construction. In another study [14], it was attempted to evaluate the causes and effects of schedule overruns in housing construction projects in Ghana based on expert opinions. The results of this study show that the critical delay factors are delays in payments, unstable financial conditions in the country, and change orders requested by clients. Egwim *et al.* (2021) explored the most contributing construction delay factors in Nigeria by carrying out a questionnaire with 120 construction experts. The findings demonstrate that deficiencies in quality control, site accidents, financial disabilities of contractors and owners, fluctuations in material prices, and late procurement delivery are the most prevailing causal factors in construction time overruns.

Along with the African countries, time delays are also widely observed in the construction industry of developing Asian countries. For example, the primary underlying construction delay factors were identified by using the Relative Importance Index (RII) method in Turkey [16]. For this purpose, a total of 64 construction professionals responded to the survey questions including 83-time delay factors. Inadequate experience of contractors, ineffective project scheduling and planning, and poor site

management and control were found top three major factors relevant to time delays. Besides, contractor-related factors have the most adverse effect on project completion time among the group factors. Assaf and Al-Hejji (2006) examined the main root causes of construction delays in Saudi Arabia and 73 diverse factors were defined in large construction projects by surveying with 23 contractors, 19 consultants, and 15 owners. Change orders are highlighted as the most important factor in the construction project delays according to all three expert groups. In addition, the results of this study show that the planned completion time of large construction projects extended between 10% and 30% on average in Saudi Arabia. A previous study [21] conducted a questionnaire with 77 construction stakeholders to extract the most significant attributes in the construction delays in India. The results of this study indicate that client-related factors have strong influences on the time delays in construction projects.

Construction Time Delays in Iraq

Among the Asian countries, time delays are also widely seen in construction projects carried out in Iraq which is another developing country. For example, one previous study [7] explored the most critical factors causing time delays observed in public projects in Iraq. A total of 65 delay causes were extracted from the literature and integrated into a survey conducted with 134 construction professionals. The author calculated the frequency, severity, and importance index of each causal factor related to schedule overruns. Security issues, changes in regulations, and official and non-official holidays were found the most important reasons for time overruns in the construction industry of Iraq. Waheeb and Andersen (2022) investigated the underlying causal factors leading to construction schedule overruns in Iraq via a questionnaire. For this purpose, time and schedule overruns of each construction project were analyzed to find time delay factors. The results of this study show that contractor failure, change orders and, selection of low-bid prices are the top three factors triggering cost and time variances in construction projects. Significant time delay factors in Iraqi construction projects also were explored in another previous study conducted by Khaleel (2017). To rank the attributes related to schedule overruns, the mean value of each delay factor included in the survey was considered. It is indicated that contractor-related factors such as low financial capability, lack of skilled human resources lead to postponing the deadline of the construction projects. Al Hadithi (2018) collected qualitative data from 47 respondents including the owner, contractor, and consultant, and used a frequency index to rank delay causes. Delays in material delivery, financial and political conditions of Iraq and, cash flow issues were stated as the most significant factors regarding time overruns.

Research Statement

As one can understand from the literature, there is a wide investigation on the time delay factors observed in the construction industry of different developing countries and

Iraq. Although most of these studies explored and introduced the most significant factors related to schedule overruns in construction based on diverse perspectives, few of them [20] provide proactive steps and suggestions in the eye of experts. For example, Abdul-Rahman *et al.* (2006) did not only focus on understanding time delay factors but also provide practical solutions for the Malaysian construction industry by using an expert opinion approach. On the other hand, the studies [5–7], [23, 24] mainly focused on understanding the root causes of the time overruns in the construction industry of Iraq. In one study [24] conducted in Iraq, it was attempted to define delay causes in construction projects and suggested implementing project management methodology. However, the provided suggestion is mainly relied on a theoretical body of knowledge rather than real practical applications because of only refer to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK). Since construction experts encounter difficulties in time extensions during construction projects, their suggestions are reliable and essential to reduce and prevent such schedule overruns. Therefore, one of the purposes of this study is not only to identify time delay factors in construction but also to enable long-term strategies for construction companies and immediate proactive steps to mitigate schedule delays by integrating expert opinions.

As stated above, most previous studies related to time delay causes focused on descriptive statistics and identifying the root cause factors of the schedule overruns in construction [3, 12, 19, 25]. However, this kind of information received from these studies or previous construction projects may not be actively used and integrated into the projects during planning and construction phases. Accordingly, a preventive model is highly required to represent how previous knowledge or data recorded in previous construction projects can be

returned a value while ongoing construction projects, which is called a proactive system or framework in the literature [26–28]. For example, Park *et al.* (2013) developed a proactive model for defect management in construction via using Building Information Management (BIM) and Augmented Reality (AR). In addition, a previous study [28] proposed a proactive management framework to identify material and design issues that occurred during the modular construction process. Thus, the main objective of this study is to introduce a proactive prevention model including diverse immediate practices to be implemented in construction projects and long-term suggestions for construction companies according to the responses received from the construction professionals. Accordingly, it will be possible to reduce or prevent time delays while ongoing construction projects especially in developing countries.

Research Methodology

Survey Design and Data Collection

Initially, we conducted a survey with construction professionals to identify root causes of the time delays, long-term suggestions, and immediate proactive steps to be integrated into the proactive prevention model. Before the data collection process, a questionnaire was prepared mainly based on the existing literature related to time delay causes and feedback received from the construction professionals (Appendix A). In the current study, since we aimed to uncontrollable processes during construction phases (Table 1). Here, controllable factors represent the attributes that can be interfered with by construction stakeholders, uncontrollable ones are related to outside the contractors, clients, and consultant.

Table 1 Construction Time Delays in Iraq

	ID	Time Delay Causes	[7]	[23]	[6]	[5]	[24]	[22]
Uncontrollable	U-DC1	The economic conditions of the country	X			X		
	U-DC2	Frequent official and unofficial holidays	X				X	X
	U-DC3	Government change of regulations and bureaucracy	X			X		
	U-DC4	Financial difficulties of the contractors		X	X	X	X	
	U-DC5	Selection of low-bid prices	X		X			X
Controllable	C-DC6	Delay in progress payments	X	X		X		
	C-DC7	Contracting with incompetent contractor		X	X		X	
	C-DC8	Poor project management planning		X		X	X	
	C-DC9	Design changes	X	X	X			
	C-DC10	Insufficient and incomplete feasibility studies				X		X
	C-DC11	Disputes between stakeholders			X			X
	C-DC12	Mistakes in estimating project duration			X		X	
	C-DC13	Unskilled workers	X		X			
	C-DC14	Using traditional paperwork rather than digital platforms					X	

The questionnaire was divided into four different sections; i) background and demographic information about the respondents, ii) time delay causes iii) strategies, and iv) proactive steps. In the second part, a total of 14-time delay causes stated above were included in the questionnaire. The frequency of each time delay cause was asked to participants in a 4-Likert Scale Form (1= never occurred, 2= occasionally 3= frequently, 4= always). Also, the severity of each delay cause was similarly responded to in the same questions via a 4-point Likert Scale (1= low, 2= fairly, 3= high, 4= very high). In addition to time delay causes, we asked the importance of each strategy and necessity of each proactive implementation by using a four-point Likert scale in the third and fourth parts respectively (1= low, 2= fairly, 3= high, 4= very high). Such strategies and practical applications included in the survey were mainly taken from the previous studies conducted in different countries rather than only in Iraq and feedback from the construction experts. The last three sections were prepared to integrate results achieved from the respondents into the proactive prevention models introduced in the current study. After preparing the final version of the questionnaire, it was sent out to 167 construction professionals (e.g., contractors, consultants, and clients) who are working on different construction projects in different regions in Iraq.

Data Analysis

Initially, the reliability of the collected dataset was checked via Cronbach’s alpha (α), which was used in different studies using questionnaire data for similar purposes [12], [13]. The Cronbach’s alpha (α) shows the internal consistency of the data as a coefficient, which provides information about the reliability level of collected data in a survey. The alpha (α) value is calculated as the following formula:

$$\alpha = n/(n - 1) \left(1 - \frac{\sum V_i}{V_{test}} \right) \tag{1}$$

Where n demonstrates the total number of items, V_i shows the variance score of each item and V_{test} represents the total variance score of the entire data in Eq. (1). To rank 14-time delay causes according to their importance level, we employed the Importance Index (Imp. I) computed by using the Relative Importance Index of Frequency (RII-F) and Severity (RII-S) of each item given by the respondents, which was introduced by [29] and used by [19].

$$RII - F = \frac{\sum W}{A * N} \text{ and } RII - S = \frac{\sum W}{A * N} \tag{2}$$

$$Imp. I = RII - F \times RII - S \tag{3}$$

Here, W represents the weighting value of each item (ranging from 1 to 4), either in frequency or severity, A shows the highest weight (4 in this case), and N illustrates the total number of respondents in Eq. 2. The

RII value ranges between 0 (not inclusive) and 1 and the importance of the item increases when RII goes from 0 to 1. On the other hand, since the frequency and severity of each item in these questions were not measured, the necessity of each proactive step and the importance of each strategy were ranked according to the calculated RII value. By following a previous study [12], Spearman’s correlation test was also conducted to check agreement degree between different construction stakeholders (e.g., clients, contractors, and consultants) on proactive steps and strategies received from the participants.

Results

Descriptive Statistics

A total number of 140 construction professionals including 59 clients, 38 consultants, and 43 contractors responded to the survey (Table 2). While 53.6% of the participants have working experience in public and private sectors, 12.9% and 33.6% of them only worked for private or public construction companies respectively.

Table 2 Descriptive Statistics of the Respondents

Parameter	Category	Resp. (N)	Freq. (%)
Sector	Private	18	12.9
	Public	47	33.6
	Both	75	53.6
Experience	Less than 10 years	30	21.4
	10-15 years	21	15
	15-20 years	48	34.3
	More than 20 years	41	29.3
Firm Type	Client	59	42.1
	Consultant	38	27.1
	Contractor	43	30.7
Field of Expert	Buildings	54	38.5
	Infrastructure	34	24.4
	Mechanical and Electrical	27	19.2
	Other	25	17.9
Contractual Type	Traditional	42	30
	Management	18	12.9
	Contractor		
	Design-Build	33	23.6
	Construction Management	47	33.6
Average Project Delay	Less than 10%	18	12.9
	Between 10% and 30%	48	34.2
	Between 30% and 50%	63	45
	More than 50%	11	7.9

The majority of these respondents (78.6%) have more than 10 years of experience in construction sites. In addition, the participants worked in different types of projects such as buildings (38.5%), infrastructures (24.4%), and mechanical- electrical ones (19.2%). Also, they took place in projects conducted via different kinds of contract types such as traditional (30%),

management contractor (12.9%), design-build (23.6%), and construction management (33.6%). Besides, most of them (87.1%) stated that they experienced more than 10% time overruns in construction projects.

Survey Results

Initially, we considered the Cronbach’s alpha (α) value of each scaled item to present the reliability of the collected survey data (Table 3). Cronbach’s alpha (α) of collected items for frequency ($\alpha=0.827$) and severity ($\alpha=0.898$) of the time delay causes is greater than 0.7, which is accepted as a limit value for validation of the survey data [30] and used in a previous study [12]. Also, the collected data related to strategies ($\alpha=0.788$) and proactive steps ($\alpha=0.843$) is reliable.

Table 3 Reliability Test Results

	Time Delay Causes		Remedies	Proactive Steps
	Frequency	Severity		
Cronbach's Alpha (α)	0.827	0.898	0.788	0.843

The results of survey analysis show that the most important time delay factor is “Contracting with the incompetent contractor” according to clients (Imp. I = 0.595, Rank=1) and contractors (Imp. I = 0.605, Rank=1). In addition, “Delay in payment progress” (is ranked as the second significant critical factor leading to time overruns in construction projects according to the overall result (Imp. I= 0.549, Rank =2). “Financial

difficulties of the contractors” (overall; Imp. I = 0.531, Rank=3) and “Selection of low-bid prices” (overall; Imp. I=0.508, Rank=4) are another major delay causes in the construction industry of Iraq. On the other hand, “Using traditional paperwork rather than digital platforms” (overall; Imp. I=0.333, Rank=13) and “Frequent official and unofficial holidays” (overall; Imp. I= 0.271, Rank=14) are the least contributing factor in construction schedule overruns for all three groups (Table 4). In addition, Spearman’s correlation analysis results (Table 7) show that there is a significant agreement on the time delay causes between all three groups such as clients-contractors ($\rho=0.616$, $p=0.019$), clients-consultants ($\rho=0.684$, $p=0.007$), and contractors-consultants ($\rho=0.88$, $p<0.001$).

According to the results, one of the most two important long-term strategies given by the respondents are “Adopting novel PM methods” (RII=0.793) and “Risk management system” (RII=0.657, Rank=2). “Site supervision and control mechanism” is also highlighted as a long-term strategy to prevent or reduce time overruns in construction projects by consultants (RII=0.628, Rank=3) and contractors (RII=0.621, Rank=3). However, “Offering bonus for early completion” is thought as the least effective strategy to be considered in the construction industry (overall; RII= 0.554, Rank=6) (Table 5). In addition, an agreement does not exist between clients-consultants ($\rho=0.086$, $p=0.872$) and clients-contractors ($\rho=0.314$, $p=0.544$), but contractors-consultants ($\rho=0.771$, $p=0.072$) have agreement on the provided strategies (Table 7).

Table 4 Importance Index and Rank of Time Delay Causes

ID	Time Delay Causes	Client		Consultant		Contractor		Overall	
		Imp. I	Rank	Imp. I	Rank	Imp. I	Rank	Imp. I	Rank
C-DC7	Contracting with incompetent contractor	0.595	1	0.623	2	0.601	1	0.605	1
C-DC6	Delay in payments progress	0.46	3	0.637	1	0.601	2	0.549	2
U-DC4	Financial difficulties of the contractors	0.503	2	0.543	4	0.561	4	0.531	3
U-DC5	Selection of low-bid prices	0.414	7	0.583	3	0.578	3	0.508	4
C-DC8	Poor project management planning	0.427	5	0.507	6	0.517	5	0.476	5
U-DC3	Government change of regulations and bureaucracy	0.434	4	0.513	5	0.486	6	0.472	6
C-DC9	Design changes	0.425	6	0.485	9	0.437	10	0.445	7
C-DC10	Insufficient and incomplete feasibility studies	0.407	8	0.463	10	0.47	8	0.441	8
C-DC11	Disputes between stakeholders	0.377	11	0.496	7	0.471	7	0.436	9
C-DC12	Mistakes in estimating project duration	0.405	9	0.448	11	0.443	9	0.426	10
C-DC13	Unskilled workers	0.399	10	0.486	8	0.382	12	0.416	11
U-DC1	The economic condition of country	0.373	12	0.417	12	0.436	11	0.404	12
C-DC14	Using traditional paperwork rather than digital platforms	0.294	13	0.382	13	0.344	13	0.333	13
U-DC2	Frequent official and unofficial holidays	0.248	14	0.284	14	0.292	14	0.271	14

Table 5 Relative Importance Index (RII) of the Remedies

ID	Strategies	Client		Consultant		Contractor		Overall	
		RII	Rank	RII	Rank	RII	Rank	RII	Rank
R1	Adopting novel PM methods	0.746	1	0.796	1	0.855	1	0.793	1
R2	Risk management system	0.61	2	0.671	2	0.709	2	0.657	2
R3	Site supervision and control mechanism	0.593	4	0.658	3	0.628	3	0.621	3
R4	Handover of project in stages	0.602	3	0.546	6	0.593	4	0.584	4
R5	Last planner system	0.572	5	0.592	4	0.558	6	0.573	5
R6	Offering bonus for early completion	0.508	6	0.586	5	0.587	5	0.554	6

Table 6 Relative Importance Index (RII) of the Proactive Steps

ID	Immediate proactive steps	Client		Consultant		Contractor		Overall	
		RII	Rank	RII	Rank	RII	Rank	RII	Rank
P1	Criteria for contractor or subcontractor selection	0.771	1	0.816	1	0.907	1	0.825	1
P2	BIM usage for project management	0.72	2	0.744	3	0.808	3	0.754	2
P3	VR/AR-based staff training	0.695	3	0.737	4	0.849	2	0.754	3
P4	Hiring qualified planning/site engineer	0.674	4	0.757	2	0.773	4	0.727	4
P5	Blockchain for smart contracts	0.64	5	0.671	5	0.738	5	0.679	5
P6	VR/AR-based meeting system	0.602	6	0.658	6	0.686	6	0.643	6

The results also indicate that all three groups point out “Distinct criteria for contractor selection” to be practiced among the proactive steps (overall; RII=0.825, Rank1). “BIM usage for project management” is ranked as the second required immediate proactive step to be implemented in the construction industry to avoid extending construction project deadlines (overall; RII=0.754, Rank=2). On the other hand, one proactive step “VR/AR-based meeting system” is not suggested as an important practical solution to mitigate construction time delays (overall, RII=0.643, Rank=6) (Table 6). According to Spearman’s correlation analysis results (Table 7), while there is a significant agreement on the proactive steps between contractors and consultants responded to the survey ($\rho=0.771$, $p=0.072$), clients and contractors ($\rho=0.6$, $p=0.208$), and clients and consultants ($\rho=0.714$, $p=0.111$), do not have agreement on the practical implementations.

Discussion

Different studies have attempted to explore time delay causes in the construction industry and identified diverse contributing factors in various countries. In the current study, we do not only investigate the root causes of time delays in construction but also provide long-term strategies for construction companies and immediate practical applications in the eye of experts who took place in Iraqi construction projects. The findings of this study show that the top two-time delay

factors such as “Contracting with the incompetent contractor” and “Delay in payments progress” are controllable and can be prevented through following the right strategies and implementing exact proactive steps. These two factors are mainly related to contractors and clients in the construction industry [16]. This result is also consistent with previous studies conducted in Iraq (e.g., Aljamee and Naeem (2020), ; Khaleel and Hadi (2017); Mohammed and Jasim 2017) and other developing countries such as Turkey [16], Pakistan [31], Saudi Arabia [18], and Qatar [25]. The low experience of Iraqi construction companies in conducting especially mega-infrastructure and residential projects causes an invitation of foreign construction companies, which leads to transferring financial sources to outside. [4]. This situation also interrupts financial circulation and deteriorates the economic growth of these countries. Other two important causal factors leading to time overruns in a construction project (e.g., “Financial difficulties of the contractors” and “Selection of low-bid prices” are more related to the economic conditions of Iraq, which is also found in other studies [5, 6, 24]. Most Iraqi contractors have difficulties in finding letters of guarantee during the bidding process and financial sources after starting a construction project. Accordingly, the local companies have to stop construction without completion, which is another reason for coming foreign construction companies.

Table 7 Spearman's Correlation Analysis Results

Groups	Delay Causes		Remedies		Proactive Steps	
	Spearman's Correlation Coefficient (ρ)	Sig. Value (p)	Spearman's Correlation Coefficient (ρ)	Sig. Value (p)	Spearman's Correlation Coefficient (ρ)	Sig. Value (p)
Clients-Contractors	0.616	0.019	0.314	0.544	0.714	0.111
Clients-Consultants	0.684	0.007	0.086	0.872	0.6	0.208
Contractors-Consultants	0.88	0.000	0.771	0.072	0.771	0.072

Iraq. This situation is also related to the selection of low bid prices. Iraq government institutions only consider the low bid prices rather than experience in megaprojects, which require huge amounts of money and experience. As one can understand from here that controllable and uncontrollable delay causes in construction projects influence each other and create a vicious cycle for the economic condition of the country.

According to expert opinions, we also introduce the most important strategies for the construction industry and urgent proactive steps during a construction project. Here, while strategies refer to suggestions to be integrated by construction companies for the long term, proactive steps represent the actions that can be immediately practiced in projects while planning or construction phases. The first ranked suggestion "Adopting novel PM methods" shows that it is highly required to adopt new methodologies in project management instead of following traditional construction techniques in Iraq. It is widely indicated that the main challenge in construction projects carried out in developing countries is not open to new techniques and innovative solutions [32]. Besides, second "Risk management system" and third "Site supervision and control mechanism" important recommendations stated by the construction experts are highly relevant to tracking each project performance item (e.g., time, cost, and quality) and risk management of projects during construction phases. However, such professional Project Management (PM) approaches are still lacking in the construction industry of Iraq and other developing countries [33]. Therefore, the application of new PM methods should start with public projects by the government. By following this strategy, it is believed to positively influence all stakeholders in the construction industry. Also, knowledge from foreign professional construction companies can be transferred to local construction companies via subcontracting them in huge projects.

Since there is a significant match between time delay factors and practical applications stated by the construction professionals, proactive steps have great potential to prevent the contributing factors for schedule overruns observed in Iraq. For example, whereas the most important causal factor in time delay is the

incompetence of contractor and subcontractors, distinct criteria for contractor selection is identified as the most effective solution for construction time delays. All three groups point out the necessity of a distinct criteria list for the selection of contractors and subcontractors while planning and construction phases are carried out. Particularly, disputes between client-contractors and contractors- subcontractors lead to schedule overruns in construction projects [19]. It is a well-known fact that the circulation of subcontractors during the construction phase has adverse effects on project performance. Thus, each contractor or client should have their criteria list to be used during the selection of contractor or subcontractor according to project type. The second important proactive step provided by the participants is the usage of Building Information Modeling (BIM). The benefits of BIM such as improving project performance and reducing conflicts, schedules, and cost overruns have been widely proven in several studies [34,35]. The lack of high-skilled workers and engineers is another common problem in the construction industry of Iraq [7] as well as in other developing countries such as Nigeria [15] and Pakistan [31]. Investments in digital technologies such as VR/AR systems should be done to improve the skills of the labor force in carrying out special construction tasks and awareness of occupational safety risks, which is highly suggested in previous studies [36-37]. Also, software training sessions could be provided for engineers on schedule planning and budget estimation to increase their capability on these fundamental PM aspects while planning and construction stages of the projects.

Proactive prevention model

Along with identifying the time delay causes, strategies, and proactive steps, we introduce a proactive prevention model to mitigate or prevent time delays in the construction industry of the developing countries and Iraq (Fig. 1). The proposed model is divided into three main stages such as planning, construction, and operation. At the planning phase of a new construction project, daily data recorded in previous internal and external construction projects (historical time data) should be used to generate an AI-based predictive model according to project type. Such a predictive model can be initially used to estimate the completion time of a new project based on construction activities

that will be carried out in that project. Then, the predictive model can be fed with new daily schedule data during the construction phase of the project. After feeding the predictive model with daily time data, it is possible to conduct Time Series Analysis (TSA) to check schedule variance. In this sense, a comparison can be done between the New Predicted Completion Time (NPCT) and original Predicted Completion Time (PCT) at the end of each month (M_i) to check the project progress whether it is behind or ahead of the original project deadline. If NPCT is equal to or less than PCT, it can be understood that the project performance is at the desired level. In this scenario, project administration should look at the right strategies they followed to pursue such practices during the rest of the project stage. If NPCT is greater than PCT at month M_i , it can be said that the project is behind the planned schedule. In this step, the project administration should initially find the time delay reasons in the current construction project. According to time delay causes (if controllable), proactive steps can be immediately realized in the current project, or general suggestions could be considered as future or long-term strategies by the construction company. By following these steps, it is possible to prevent or reduce time delays in construction projects. Such preventive models have been proved to provide major opportunities for practitioners to monitor and take action according to the situation while the ongoing construction process [26, 28].

Identifying risk management strategies should not be only based on the previous projects and descriptive statistics, but also information gathered during the

construction phase should be actively utilized. Accordingly, project administrators could have a chance to show reactions and implement immediate proactive actions while ongoing projects. Although recording information during construction projects has gained importance for last years, there is a still lack of data collection and sharing systems in the construction industry. Therefore, data collection and open access systems are highly essential to realize this kind of proactive model. The main contribution of this study is to provide a proactive model to be utilized in construction projects during planning and construction stages. Since the proposed model consists of different long-term strategies and urgent proactive applications taken from the construction experts, it could be more reliable and applicable. Besides, such a preventive model can be also implemented not only in construction projects carried out in Iraq but also in other developing countries. Along with the practical contribution, this study could open a new door to develop an AI-based time predictive model to be used in construction projects and provide diverse proactive steps and recommendations with the help of construction professionals. These points could be theoretical contributions of this study. Apart from the contributions, the current study has some limitations. This kind of model also can be developed for cost overruns observed in construction projects. Besides, empirical data related to time delays received from a previous construction project can be tested by using TSA without any AI-based predictive model. All mentioned limitations could be addressed in future studies..

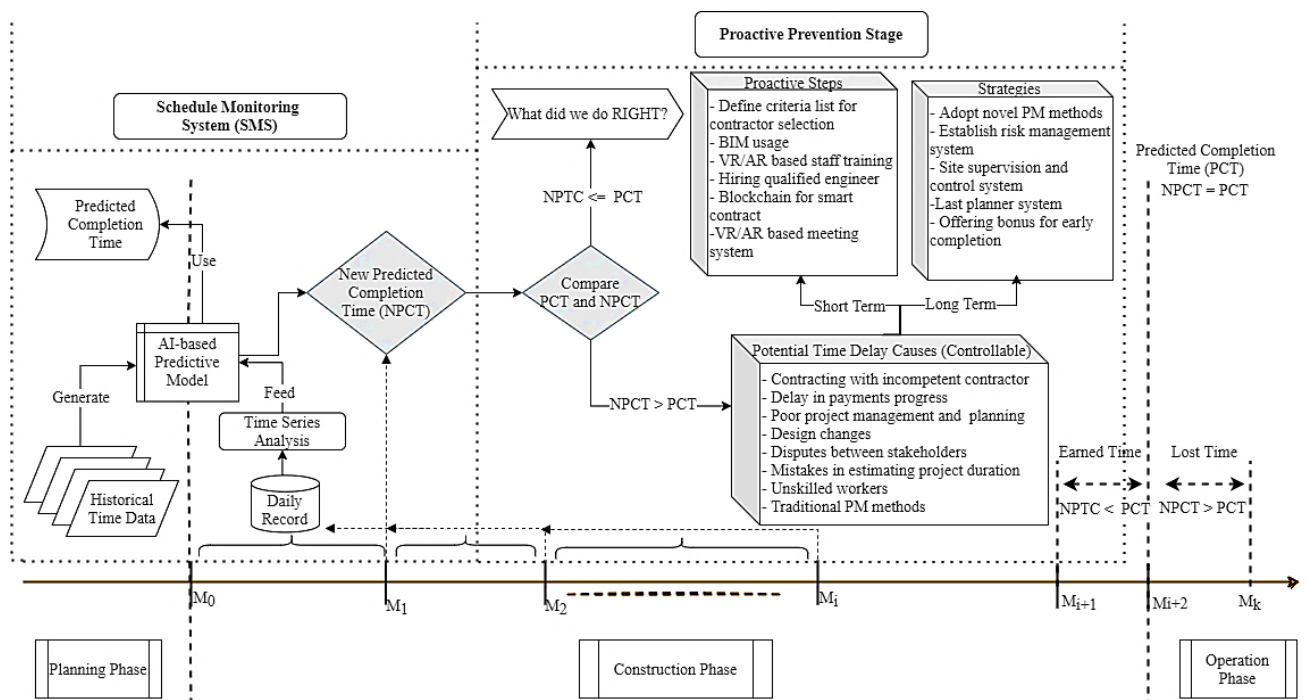


Figure 1 Proactive prevention model for time delays in construction

Conclusion

In the current study, we attempted to introduce a proactive prevention model to reduce or prevent schedule overruns in construction projects carried out in developing countries. For this purpose, a survey was conducted to identify the root cause factors of the time delays and explore long-term strategies and proactive steps on such schedule overrun issues in the eye of construction experts. The collected survey data was integrated into the developed proactive prevention model which involves a number of steps to be practiced during planning and construction phases.

Since such construction professionals encounter real issues related to project performance criteria such as time, cost, and quality, their opinions should be initially considered. Therefore, identifying proactive steps and general suggestions with the help of construction experts rather than just relying on the theoretical body of knowledge is important to achieve more reliable consequences. Accordingly, the introduced proactive prevention model could be more applicable and feasible for the construction industry of developing countries since construction performance issues are similar in those countries. Also, even though a case study was carried out for Iraqi construction projects, the steps included in the proactive prevention model can be easily adapted by other developing countries. Following these preventive steps will provide great opportunities to practitioners in improving the performance of construction projects and preventing disputes between stakeholders. The most important point of this kind of proactive model is to return information recorded in previous and ongoing projects to value by using AI-based algorithms. It should be here noted that data collection and open access systems are considerably required to realize such proactive prevention models in construction projects. In addition, identifying time delay causes and following the right practical implementations during ongoing projects will have vital roles in saving time in construction projects.

Data Availability Statement

Some or all data, models, or code that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgment

The authors would like to thank the construction experts who participated in the survey process for their efforts.

Ethics committee permission

The authors acquired ethics committee permission for surveys implemented in this paper from the Istanbul Gedik University Ethics Commission (Date: 28/03/2022; No: E-56365223-050.01.04-2022.137548.71-336).

Declaration of conflicting interests

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

References

- [1] D. W. M. Chan and M. M. Kumaraswamy, "A comparative study of causes of time overruns in Hong Kong construction projects," *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 15, no. 1, pp. 55–63, 1997, doi: 10.1016/S0263-7863(96)00039-7.
- [2] D. Arditi and T. Pattanakitchamroon, "Selecting a delay analysis method in resolving construction claims," *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 24, no. 2, pp. 145–155, 2006, doi: 10.1016/j.ijproman.2005.08.005.
- [3] A. Kazaz, S. Ulubeyli, and N. A. Tuncbilekli, "Causes of delays in construction projects in Turkey," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 18, no. 3, pp. 426–435, 2012, doi: 10.3846/13923730.2012.698913.
- [4] R. Radhi, R. Halim, and M. Jamal, "Exploring Building & Construction in Iraq," 2021. [Online]. Available: <https://kapita.iq/content/issue/building-and-construction-iraq>.
- [5] B. I. Al Hadithi, "An investigation into factors causing delays in highway construction projects in Iraq," in *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 162, doi: 10.1051/mateconf/201816202035.
- [6] T. Khaleel and Z. Hadi, "Controlling of Time-Overrun in Construction Projects in Iraq," *Eng. Technol. J.*, vol. 35, no. 2, p. Vol. 35, Part A, No. 2, pp. 111–117, 2017.
- [7] J. A. Alsuliman, "Causes of delay in Saudi public construction projects," *Alexandria Eng. J.*, vol. 58, no. 2, pp. 801–808, 2019, doi: 10.1016/j.aej.2019.07.002.
- [8] G. Ofori, "Nature of the construction industry, its needs and its development: A review of four decades of research," *J. Constr. Dev. Ctries.*, vol. 20, no. 2, pp. 115–135, 2015.
- [9] R. Takim and A. Akintoye, "Performance Indicators for Successful Construction Project Performance," in *18th Annual ARCOM Conference.*, 2002, vol. 2, no. September, pp. 545–555.
- [10] A. P. C. Chan and A. P. L. Chan, "Key performance indicators for measuring construction success," *Benchmarking*, vol. 11, no. 2, pp. 203–221, 2004, doi: 10.1108/14635770410532624.
- [11] A. B. Ngowi, E. Pienaar, O. Akindele, and D. S. Iwisi, "Globalisation of the construction industry: A review of infrastructure financing," *Journal of Financial Management of Property and Construction*, vol. 11, no. 1, pp. 45–58, 2006, doi: 10.1108/13664380680001079.
- [12] O. Bagaya and J. Song, "Empirical Study of Factors Influencing Schedule Delays of Public

- Construction Projects in Burkina Faso,” *J. Manag. Eng.*, vol. 32, no. 5, p. 05016014, 2016, doi: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000443.
- [13] C. N. Egwim, H. Alaka, L. O. Toriola-Coker, H. Balogun, S. Ajayi, and R. Oseghale, “Extraction of underlying factors causing construction projects delay in Nigeria,” *J. Eng. Des. Technol.*, 2021, doi: 10.1108/JEDT-04-2021-0211.
- [14] C. T. Amoatey, Y. A. Ameyaw, E. Adaku, and S. Famiyeh, “Analysing delay causes and effects in Ghanaian state housing construction projects,” *Int. J. Manag. Proj. Bus.*, vol. 8, no. 1, pp. 198–214, 2015, doi: 10.1108/IJMPB-04-2014-0035.
- [15] B. Mpofu, E. G. Ochieng, C. Moobela, and A. Pretorius, “Profiling causative factors leading to construction project delays in the United Arab Emirates,” *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 24, no. 2, pp. 346–376, 2017, doi: 10.1108/ECAM-05-2015-0072.
- [16] M. Gündüz, Y. Nielsen, and M. Özdemir, “Quantification of Delay Factors Using the Relative Importance Index Method for Construction Projects in Turkey,” *J. Manag. Eng.*, vol. 29, no. 2, pp. 133–139, 2013, doi: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000129.
- [17] M. Jahangoshai Rezaee, S. Yousefi, and R. K. Chakraborty, “Analysing causal relationships between delay factors in construction projects: A case study of Iran,” *Int. J. Manag. Proj. Bus.*, vol. 14, no. 2, pp. 412–444, 2021, doi: 10.1108/IJMPB-01-2019-0020.
- [18] A. Al-Kharashi and M. Skitmore, “Causes of delays in Saudi Arabian public sector construction projects,” *Constr. Manag. Econ.*, vol. 27, no. 1, pp. 3–23, 2009, doi: 10.1080/01446190802541457.
- [19] S. A. Assaf and S. Al-Hejji, “Causes of delay in large construction projects,” *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 24, no. 4, pp. 349–357, 2006, doi: 10.1016/j.ijproman.2005.11.010.
- [20] H. Abdul-Rahman, M. A. Berawi, A. R. Berawi, O. Mohamed, M. Othman, and I. A. Yahya, “Delay Mitigation in the Malaysian Construction Industry,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 132, no. 2, pp. 125–133, 2006, doi: 10.1061/(asce)0733-9364(2006)132:2(125).
- [21] H. Doloi, A. Sawhney, and K. C. Iyer, “Structural equation model for investigating factors affecting delay in Indian construction projects,” *Constr. Manag. Econ.*, vol. 30, no. 10, pp. 869–884, 2012, doi: 10.1080/01446193.2012.717705.
- [22] R. A. Waheeb and B. S. Andersen, “Causes of Problems in Post-Disaster Emergency Re-Construction Projects—Iraq as a Case Study,” *Public Work. Manag. Policy*, vol. 27, no. 1, pp. 61–97, 2022, doi: 10.1177/1087724X21990034.
- [23] S. R. Mohammed and A. J. Jasim, “Study and Analysis of the Delay Problems in Iraqi Construction Projects,” *Int. J. Sci. Res.*, vol. 6, no. 5, pp. 2331–2336, 2017, [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/f97b/8a84d52aaf69fa2de5d1b1108a3147b88705.pdf>.
- [24] H. K. Aljamee and S. M. Naeem, “The benefits of applying project management methodology on project delay: A study in construction projects in Iraq,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 745, no. 1, doi: 10.1088/1757-899X/745/1/012155.
- [25] M. Gunduz and S. R. Tehemar, “Assessment of delay factors in construction of sport facilities through multi criteria decision making,” *Prod. Plan. Control*, vol. 31, no. 15, pp. 1291–1302, 2020, doi: 10.1080/09537287.2019.1704903.
- [26] C. S. Park, D. Y. Lee, O. S. Kwon, and X. Wang, “A framework for proactive construction defect management using BIM, augmented reality and ontology-based data collection template,” *Autom. Constr.*, vol. 33, pp. 61–71, 2013, doi: 10.1016/j.autcon.2012.09.010.
- [27] S. Hwang and L. Y. Liu, “Proactive project control using productivity data and time series analysis,” in *Proceedings of the 2005 ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering*, 2005, pp. 1925–1935, doi: 10.1061/40794(179)179.
- [28] M. S. A. Enshassi, S. Walbridge, J. S. West, and C. T. Haas, “Dynamic and Proactive Risk-Based Methodology for Managing Excessive Geometric Variability Issues in Modular Construction Projects Using Bayesian Theory,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 146, no. 2, p. 04019096, 2020, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001747.
- [29] L. Le-Hoai, Y. D. Lee, and J. Y. Lee, “Delay and cost overruns in Vietnam large construction projects: A comparison with other selected countries,” *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 12, no. 6, pp. 367–377, 2008, doi: 10.1007/s12205-008-0367-7.
- [30] L. J. Cronbach, P. Schönemann, and D. Mckie, “Alpha coefficients for stratified-parallel tests,” *Educ. Psychol. Meas.*, vol. 25, no. 2, pp. 291–312, 1965, doi: 10.1177/001316446502500201.
- [31] A. Maqsoom, R. M. Choudhry, M. Umer, and T. Mehmood, “Influencing factors indicating time delay in construction projects: impact of firm size and experience,” *Int. J. Constr. Manag.*, vol. 21, no. 12, pp. 1251–1262, 2021, doi: 10.1080/15623599.2019.1613206.
- [32] G. Ofori, “Construction in developing countries: Need for new concepts,” *J. Constr. Dev. Ctries.*, vol. 23, no. 2, pp. 1–6, 2019, doi: 10.21315/JCDC2018.23.2.1.
- [33] A. A. Ezzat Othman, “Challenges of mega construction projects in developing countries,” *Organ. Technol. Manag. Constr. An Int. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 730–746, 2013, doi: 10.5592/otmcj.2013.1.10.

[34] A. H. Abd Jamil and M. S. Fathi, "Enhancing BIM-Based Information Interoperability: Dispute Resolution from Legal and Contractual Perspectives," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 146, no. 7, p. 05020007, 2020, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001868.

[35] B. Fanning, C. M. Clevenger, M. E. Ozbek, and H. Mahmoud, "Implementing BIM on Infrastructure: Comparison of Two Bridge Construction Projects," *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, vol. 20, no. 4, p. 04014044, 2015, doi: 10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000239.

[36] G. Kazar and S. Comu, "Effectiveness of Serious Games for Safety Training: A Mixed Method Study," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 147, no. 8, p. 04021091, 2021, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0002119.

[37] Y. Gao, V. A. Gonzalez, and T. W. Yiu, "The effectiveness of traditional tools and computer-aided technologies for health and safety training in the construction sector: A systematic review," *Comput. Educ.*, vol. 138, pp. 101–115, 2019, doi: 10.1016/j.compedu.2019.05.003.

Appendix A (Survey)

Part 1: Demographic Information

1	Sector	Public	
		Private	
		Both	

2	Academic Degree	Bachelor	Master	Ph.D.

3	Expert Field	Building	Infrastructure	Mechanical	Electrical	Other

4	Firm Type	Contractor	Client	Consultant

5	Contractual Type	Traditional	Management	Contractor	Design-Build	Construction Management

6	Average Project Delay	Less than 10%	Between 10%-30%	Between 30%-50% years	More than 50%

7	Job Experience	Less than 5 years	Between 5-15 years	Between 15-25 years	More than 25 years

Part 2

Please rank the major delay factors observed in construction projects based on their occurrence frequency and severity from 1 to 4 as shown in the table below.

scale	frequently	severity
1	Never	Not effect
2	occasionally	Fairly sever
3	frequently	Severe
4	always	Very severe

NO	Major delay factor	Frequency				Severity			
		1	2	3	4	1	2	3	4
1	Design changes								
2	Financial difficulty from the contractors								
3	Poor project management planning								
4	Mistakes in estimating project duration								
5	Contracting with incompetent contractor								
6	The economic crisis of the country								
7	Using traditional paperwork more than software programs								
8	Delay in progress payments by the owner								
9	Frequent official and unofficial holidays								
10	Government change of regulations and bureaucracy								
11	Insufficient and incomplete feasibility studies								
12	Political decisions and political realities								
13	Inadequate the financial allocations								
14	Unskilled workers								

Part 3 Strategies

Please rank each item based on the importance for construction projects as a strategy.

NO	Proactive steps	Importance			
		1	2	3	4
1	Adopting novel PM methods				
2	Risk management system				
3	Site supervision and control mechanism				
4	Handover of project in stages				
5	Last planner system				
6	Offering bonus for early completion				

Part 4 Immediate proactive steps

Please rank each item based on the importance for construction projects as an urgent proactive step.

NO		Importance			
		1	2	3	4
1	Criteria for contractor or subcontractor selection				
2	BIM usage for project management				
3	VR/AR-based staff training				
4	Hiring qualified planning/site engineer				
5	Blockchain for smart contracts				
6	VR/AR-based meeting system				