



Journal of Engineering Sciences Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

April/Nisan 2025



Volume 12 Cilt 12



ADIYAMAN ÜNİVERSİTESİ

Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Journal of Engineering Science of Adıyaman University

e-ISSN: 2149-0309

Cilt:12 Sayı:25 Volume:12 Issue:25

Nisan/April 2025

Yazışma Adresi/Correspondence Address: Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi e-mail: <u>mfs@adiyaman.edu.tr</u> <u>tgoksu@adiyaman.edu.tr</u>

BAŞ EDİTÖR/EDITOR-IN-CHIEF

İnşaat Mühendisliği, İnşaat Mühendisliğinde SayısalProf. Dr. M. Fatih ŞAHANModelleme, Yapı Dinamiği, Yapı Mühendisliği,
Kompozit Malzeme Mekaniği

EDITÖR YARDIMCILARI/ ASSISTANT EDITORS

Doç. Dr. Sercan YALÇIN	Bilgi ve Bilgi İşleme Bilimleri, Görüntü İşleme, Ağ Oluşturma ve İletişim, Derin Öğrenme, Nöral Ağlar
Dr. Öğr. Üyesi Taha Tuna GÖKSU	Mühendislik, Akışkan Akışı, Isı ve Kütle Transferinde Deneysel Yöntemler, Akışkan Akışı, Isı ve Kütle Transferinde Hesaplamalı Yöntemler (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Dahil)

EDİTÖRLER KURULU/EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Yavuz DEMİRCİ	Çevresel Biyoteknoloji, Çevresel Biyojeokimya, Çevre Mühendisliği, Arıtma Tesisi Tasarımı, Atık Yönetimi, Azaltma, Yeniden Kullanım ve Geri Dönüşüm
Doç. Dr. Abdurrahman ÖZBEYAZ	Bilgi ve Bilgi İşleme Bilimleri Algoritmalar ve Hesaplama Kuramı Derin Öğrenme Yapay Zeka (Diğer)
Doç. Dr. Miraç UÇKUN	Gıda Bilimleri ve Mühendisliği
Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI	İnşaat Mühendisliği, İnşaat Mühendisliğinde Sayısal Modelleme
Doç. Dr. Önder ÇOBAN	Denetimli Öğrenme, Grafik, Sosyal ve Multimedya Verileri, Veri Madenciliği ve Bilgi Keşfi, Doğal Dil İşleme

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

Prof. Dr. Yavuz DEMİRCİ	Çevresel Biyoteknoloji, Çevresel Biyojeokimya, Çevre Mühendisliği, Arıtma Tesisi Tasarımı, Atık Yönetimi, Azaltma, Yeniden Kullanım ve Geri Dönüşüm
Doç. Dr. Abdurrahman ÖZBEYAZ	Bilgi ve Bilgi İşleme Bilimleri Algoritmalar ve Hesaplama Kuramı Derin Öğrenme Yapay Zeka (Diğer)
Doç. Dr. Sercan YALÇIN	Bilgi ve Bilgi İşleme Bilimleri, Görüntü İşleme, Ağ Oluşturma ve İletişim, Derin Öğrenme, Nöral Ağlar
Doç. Dr. Miraç UÇKUN	Gıda Bilimleri ve Mühendisliği
Doç. Dr. Musa EŞİT	Atmosfer Bilimleri, Hidroloji
Dr. Öğr. Üyesi Kazim Ahmet HASIM	İnşaat Mühendisliği, Betonarme Yapılar, Deprem Mühendisliği, İnşaat Mühendisliğinde Sayısal Modelleme, Yapı Dinamiği, Yapı Mühendisliği, Katı Mekanik, Mühendislik Tasarımı
Dr. Öğr. Üyesi Taha Tuna GÖKSU	Mühendislik, Akışkan Akışı, Isı ve Kütle Transferinde Deneysel Yöntemler, Akışkan Akışı, Isı ve Kütle Transferinde Hesaplamalı Yöntemler (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Dahil)
Dr. Öğr. Üyesi Sabih OVALI	Lif Teknolojisi
Dr. Öğr. Üyesi Kâmil VARINCA	İklim Değişikliği-Etkiler ve Adaptasyon, Çevre Mühendisliği, Atık Yönetimi, Azaltma, Yeniden Kullanım ve Geri Dönüşüm, Çevre Kirliliği ve Önlenmesi, Çevresel Olarak Sürdürülebilir Mühendislik, Katı ve Tehlikeli Atıklar, Küresel Çevre Mühendisliği, Temiz Üretim Teknolojileri, Yenilenebilir Enerji Sistemleri
Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI	İnşaat Mühendisliği, İnşaat Mühendisliğinde Sayısal Modelleme
Dr. Arş. Gör. Timuçin Alp ASLAN	İnşaat Mühendisliği, İnşaat Mühendisliğinde Sayısal Modelleme, Yapı Dinamiği
Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan KAYA	Kompozit ve Hibrit Malzemeler

DANIŞMA KURULU/ADVISORY BOARD

Prof. Dr. Özgür ÖZDEMİR	Arıtma Tesisi Tasarımı, Altyapı Mühendisliği ve Varlık Yönetimi, Su Hasadı, Su Kaynakları ve Su Yapıları, Atıksu Arıtma Süreçleri, Kalite Yönetimi, Hidroloji
Prof. Dr. Beytullah Temel	İnşaat Mühendisliğinde Sayısal Modelleme Yapı Dinamiği Katı Mekanik
Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ	Katı Mekanik, Kompozit ve Hibrit Malzemeler, CAD/CAM Sistemleri
Prof. Dr. Naki TÜTÜNCÜ	Katı Mekanik, Makine Mühendisliğinde Sayısal Yöntemler
Prof. Dr. Adem ERSOY	Madencilik Yöntemleri ve Maden Sistem Analizi, Metalik Madenler
Prof. Dr. Gaye KAYA	Tekstil Bilimleri ve Mühendisliği
Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ	İnşaat Mühendisliği, Betonarme Yapılar, Yapı Malzemeleri
Prof. Dr. Selahattin KOCAMAN	Görüntü İşleme, Akışkan Mekaniği ve Termal Mühendislik, Akışkan Akışı, Isı ve Kütle Transferinde Hesaplamalı Yöntemler (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Dahil), Su Kaynakları ve Su Yapıları
Prof. Dr. Cem ONAT	Akıllı Robotik, Makine Teorisi ve Dinamiği

İNGİLİZCE DİL EDİTÖRÜ / ENGLISH LANGUAGE EDITOR

Arş. Gör. Betül ÇİMENLİ OLCARS

TÜRK DİLİ EDİTÖRÜ / TURKISH LANGUAGE EDITOR

Dr. Ayhan DOST

İÇİNDEKİLER/TABLE OF CONTENTS

Sıra	Makale Başlığı	Yazarlar	Sayfa
1	FRP Donatılı Derin Betonarme Kirişlerin Yük ve Sehim Kapasitelerinin Modellenmesi	Merve Ete, Abdulkadir Çevik	1-19
2	Thermal Control System Developed to Maximize the Use of Renewable Energy Space Heating Systems	Mehmet Latif Levent	20-32
3	Esnek Yol Üst Yapısı Kaplamaların Üretiminde Çevresel Bir Yaklaşım: Odun Talaşının Kullanılabilirliğinin Deneysel Olarak Araştırılması	Halil İbrahim Yumrutaş, Mustafa Yurdabal Apak, Stive Ricardo Dongmo, Isxaq Osman Abdırahman	33-43
4	Karar Ağacı Yaklaşımı ile Doğal ve Geri Dönüştürülmüş Beton Agreganın Mesafe Bazlı Maliyet ve Emisyon Optimizasyonu	Merve Akbaş, Recep İyisan	44-59
5	Termal Kamera Görüntülerinin Çoklu Sınıflandırılması için Derin Öğrenme Tabanlı Tekniklerin Performans Karşılaştırılması	Merve Kesim Önal, Halil Uslu, Engin Avcı, Derya Avcı	60-71
6	Atık Kâğıt ve Aktif Orijinli Genleşmiş Perlit İçeren Hafif Yapı Elemanları Üzerine Bir İnceleme	Şevket Onur Kalkan, Lütfullah Gündüz	72-92
7	Performance Evaluation Of PSO Variants For Selective Harmonic Elimination In Multi- Level Inverters	Hüseyin Doğan	93-112
8	A Comparative Study of DQ and CSD Methods for Voltage Regulation in DSTATCOM-Based SEIG Systems	Ali Sait Özer, Hulusi Karaca	113-131
9	Sivas-Erzurum Alanındaki Kabuğun Tektonik Yapısının ve İzostatik Denge Durumunun Gravite Verileriyle Araştırılması	Ali Elmas	132-142
10	Automation of a Multi-Station Rotary Bending Fatigue Test Machine with PLC Control System	Abdurrahman Doğan, Kürşad Göv, İbrahim Göv	143-158



Adıyaman University Journal of Engineering Sciences Adyü J Eng Sci 2025;12(25):1-19 Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Adyü Müh Bil Derg 2025;12(25):1-19

DOI: 10.54365/adyumbd.1548867

Research Article / Araştırma Makalesi

Modeling of the Load and Deflection Response of Concrete Deep Beams Reinforced with Frp Bars

Frp Donatılı Derin Betonarme Kirişlerin Yük Ve Sehim Kapasitelerinin Modellenmesi

Merve Ete^{1*}, Abdulkadir Çevik¹

¹ Gaziantep University, Faculty of Engineering, Departmen of Civil Engineering, Gaziantep/Türkiye

Abstract	Öz
Abstract Construction sector is developing in the same direction with technological developments. Thanks to these developments, we meet new designs. Examples for these designs are FRP (Fiber Reinforced Polymer) composites can be shown. It has become a preferred material in the construction sector due to its many benefits such as being resistant to corrosion, having high tensile strength and showing resistance to chemicals. In this study, the load and deflection at the midpoint of the span for 53 simple deep beams, reinforced longitudinally with FRP rods, were calculated (this analysis was derived from the research presented in reference number 10 in the literatüre). In section 7, new formulas suggested (equation 39 and 40) for load and deflection of RC deep beams with FRP and those formulas were derived using Eureqa, which is a symbolic regression program. The suggested formulas are compared with other methods in the existing literature. According to the comparison results, it has been determined that the real-life applicability of the	Öz Yapı sektörü teknolojik gelişmelerle birlikte aynı doğrultuda gelişim sergilemektedir. Bu gelişmeler sayesinde her geçen gün yeni tasarımlar ile tanışmaktayız. Bu tasarımlara FRP (Fiber Reinforced Polymer yani Lif Takviyeli Plastik) kompozitlerini örnek olarak gösterebiliriz. Korozyona karşı dirençli olması, çekme dayanımının yüksek olması ve kimyasal maddelere karşı direnç göstermesi gibi faydalarından dolayı yapı sektöründe oldukça tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Bu çalışmada FRP çubuklar yardımı ile uzunlamasına güçlendirilen 53 adet basit mesnetli derin kirişlerin nihai aşamadaki yük ve orta açıklık sapması hesaplanmıştır (bu analiz literatürde 10 numaralı referansta sunulan makaleden elde edilmiştir). Ek olarak bölüm 7'de, FRP RC derin kirişlerin yük ve sapması için yeni formüller önerilmiş (denklem 39 ve 40) ve bu formüller, sembolik bir regresyon programı olan Eureqa kullanılarak türetilmiştir. Önerilen formüller, mevcut literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırıma
are compared with other methods in the existing literature. According to the comparison results, it has been determined that the real-life applicability of the	regresyon programı olan Eureqa kullanılarak türetilmiştir. Önerilen formüller, mevcut literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma
suggested new formulas are higher and gives more accurate results compared to other studies	sonuçlarına göre, önerilen yeni formüllerin gerçek hayattaki uygulanabilirliğinin diğer çalışmalara kıyasla daha yüksek olduğu ve daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir
<i>Keywords:</i> FRP Reinforcement, Deep Reinforced Concrete Beam, Load, Deflection	Anahtar Kelimeler: FRP Donatı, Derin Betonarme Kiriş, Yük, Sehim

^{*} Corresponding e-mail (Sorumlu yazar e-posta): <u>me11476@mail2.gantep.edu.tr</u> **Received (Geliş Tarihi):**12.09.2024, **Accepted (Kabul Tarihi):** 13.10.2024

1. Introduction

Reinforced concrete (RC) deep beams are often used for transfer girders, bridge cap beams, and pilesupported foundations [1]. The corrosion of steel reinforcement bars in reinforced concrete buildings within severe environments has emerged as a major factor contributing to concrete degradation, leading to reduced service life and expensive repairs [2].

Due to such problems in reinforced concrete structures, the use of fiber reinforced polymer (FRP) reinforcements, which is a corrosion resistant material, has emerged as an alternative solution method. It has started to be used because of its advantages such as lightness, high strength, corrosion resistance, high fatigue strength, low thermal conductivity and lack of magnetic permeability [3-4].

2. FRP bars

The usage of FRP composites in the construction industry first started for the purpose of strengthening the building elements, and then its usage areas have expanded and it is rapidly moving towards being an alternative to existing building materials [5]. FRP bars have lower weight, lower Young's modulus, and stronger strength than steel bars. The three types of fiber that are most frequently used are aramid (AFRP), glass (GFRP) and carbon (CFRP).

2.1. Types of FRP bars

FRP bars are made of different fibres (glass, carbon and aramid). The kind and shape of the surface of FRP bars may significantly vary from those of deformed steel bars. Diverse surface profiles entail varying bonding processes and causes of failure. [6].

GFRP (glass fiber reinforced polymer) bars has advantages such as resistance to corrosion, lightness, high strength, being able to give the desired shape, high fatigue resistance, low thermal conductivity properties. However, it has disadvantages such as low E-modulus, dependence of strength on fiber direction, brittle material properties, problems in adherence and clamping due to the flat surface, and being expensive [7].

AFRP (aramid fiber reinforced polymer) bars have secured a lasting and expanding presence in the construction sector due to their advantageous mechanical properties and endurance, particularly in the reinforcement of reinforced concrete elements [8]. Its specific gravity is 6 times less than steel. In addition, its modulus of elasticity is 4 times lower compared to steel. This provides advantages such as less losses due to the shrinkage and creep of the concrete and the need for during the initial stretching, the tendon extended farther.

CFRP (carbon fiber reinforced polymer) bars are dimensionally stable, resist moisture and many chemicals due to their chemical content, and have high electrical/thermal conductivity. The most important disadvantage of carbon fibers for the user is that the composite color cannot be preserved as desired due to its black color. Another disadvantage is the high cost. Carbon fibers have a strong but light structure [7].

3. Proposed study

In this chapter proposed formulas are sourced from reference [10] and showed as follows:

A modified version of study developed by Lu [9] to use concrete beams with steel reinforcement is used to forecast the midspan deviation associated with various loading stages in deep FRP RC beams [10]. This proposed study [10] was created using test results from totally 53 beams that underwent 4-point bending and were documented in the literature 11-16.

$$\Delta = \Delta \mathbf{s} + \Delta \mathbf{f} \tag{1}$$

Where, Δ is total deflection, Δ_s and Δ_f are effections deflections resulting from shearing and bending, respectively.

3.1. Cracking load (Pcr)

The cracking load P_{cr} is calculated using $P_{cr,f}$ load of cracking caused by crack of flexure and $P_{cr,w}$ load of cracking caused by cracking of the web. Pcr is determined by choosing the smaller of these two cracking values. $P_{cr,w}$ is calculated using the following equation [10],

$$\mathbf{Pcr}, \mathbf{w} = \frac{4}{3} \mathbf{fcr}, \mathbf{w} \mathbf{b} \mathbf{D}$$
(2)

where $f_{cr,w}$ is max tensile stress (N/m²) in beam's web, b is beam's width (mm), D is beam's depth(mm). In accordance with IS: 1343-1980 [17] the fcr,w magnitude is calculated as [10],

fcr, w =
$$0.24\sqrt{1.25f'c}$$
 (3)

where f'_c is compressive strength of concrete (MPa). In order to calculate the load at which flexural cracking occurs ($P_{cr,f}$) equation in below [10],

$$\operatorname{Pcr}_{\sigma} f = \operatorname{Mcr} \frac{2}{\alpha}$$
(4)

where α is shear span lenght. According to Dischinger's model [18], M_{cr} is cracking moment determined by following Equation 5 [10],

$$Mcr = \alpha ft \frac{Ig}{ymax}$$
(5)

where Ig is gross moment of inertia.

ft (stress of cracking) is provided by IS:456 [19] and it is calculated by equation in below [10],

$$ft = 0.7\sqrt{1.25f'c}$$
 (6)

 α in Equation (5) is given by [10]

$$\alpha = \begin{cases} 0.46\frac{1}{D}0.55; \ when \ 1 \le \frac{1}{D} \le 4 \\ 0.46; \ when \ \frac{1}{D} < 1 \end{cases}$$
(7)

3.2. Ultimate load (P_u)

$$\mathbf{P}\mathbf{u} = \mathbf{2}.\mathbf{V}\mathbf{u} \tag{8}$$

where P_u is ultimate load. According to Hwang and Lee [20], Ultimate shear strength V_u is calculated by following Equation 9 [10],

$$V_{u} = (k_{h} + k_{v} - 1)\xi (f'c Astr)sin\theta$$
(9)

where k_h is reinforcement index in horizontal, k_v is reinforcement index in vertical and k_v is equal to 1. ξ is softening factor. A_{str} is effective section of diagonal strut. Θ is inclination angle.

$$\xi = \frac{3.35}{\sqrt{f/c}} \le 0.52 \tag{10}$$

$$k_{h} = \mathbf{1} + (\overline{k_{h}} - \mathbf{1}) \frac{\text{Af fp}}{\text{Fh}} \le \overline{k_{h}}$$
(11)

where \overline{kh} is the highest permissible value of k_h . Af is FRP bar's area in tensile region. f_p is FRP bar's tensile strength. F_h is horizontal force of tension.

$$\bar{k}_{h} = \frac{1}{1 - 0.2(\gamma h - \gamma h 2)}$$
(12)

where γ h is horizontal factor of shear.

$$\gamma h = \frac{2 \tan \theta - 1}{3}, \text{ but } 0 \le \gamma h \le 1$$
(13)

$$\theta = \tan - 1 \left(\frac{\mathrm{jd}}{\mathrm{a}}\right) \tag{14}$$

where, as shown in Figure 1 (the datas presented in this figure are sourced from article number [10] in the literature), the distance between compressive force C and tensile force T is called as jd [10].



Figure 1. Model of the Internal Forces with Softened Strut and Tie [10]

$$\mathbf{jd} = \mathbf{d} - \frac{\mathbf{kd}}{3} \tag{15}$$

where d is effective beam depth, kd is compression zone depth, L is deep beam span.

$$k = \sqrt{[m\rho + (m-1)\rho']^2 + 2\left[m\rho + \frac{(m-1)\rho'd'}{d}\right]} - [m\rho + (m-1)\rho']; 0 \le k \le 1$$
(16)

where k is natural axis coeff. ρ' is compression reinforcement ratio. d' is a compression zone that provides cover of effective.

$$m = \frac{Ef}{Ec}$$
(17)

where E_f elasticity modulus of bars, Ec elacticity modulus of concrete. The ratio of the tension zone's longitudinal FRP reinforcement is denoted as ρ in Equation (16), and it is calculated as follows [10]

$$\rho = \frac{\mathrm{Af}}{\mathrm{bd}} \tag{18}$$

$$\rho' = \frac{Af'}{bd} \tag{19}$$

where A_f is FRP bar's area in compression region.

$$\overline{Fh} = \gamma h \ x \ \overline{kh} \ \xi \ (f'c \ Astr) \ x \ cos\theta$$
(20)

where Fh is horizontal concrete force. According to Lu [9], Astr is given by [10],

$$Astr = bs x ts$$
(21)

where b_s is strut width, t_s is strut thickness.

$$ts = \sqrt{(kd)^2 + lb^2}$$
(22)

where I_b is the upper sided loading plate's width.

$$Vu = kh \xi (f'c Astr) \sin\theta$$
(23)

 β_s is factor of strut efficiency. Equation (23) is adjusted to become Equation (24) in this purposed study [10].

$$Vu = \beta s \, kh \, \xi \, (f'c \, Astr) \, sin\theta \tag{24}$$

The regression analysis of empirical strength of shear parameter of 53 deep concrete reinforced beams made of FRP, showed in the literature [11,12,13,14,15,16] establishes the size of the effectiveness factor for strut β_s . β_s is discovered to have a value of 0.71. Equations (8) and (24) are used to calculate the shear strength and the ultimate load of the beam, respectively [10].

3.3. Calculation of the deflection caused by shear (Δ_s)

$$\Delta s = \gamma a \tag{25}$$

where γ is average shear strain. For the membrane components made of RC exposed to normal load and shear load, Hsu [21], Hwang and Lee [20-21], and Hwang et al. [23, 24 and 25] suggested using a two-dimensional compatibility condition [10].

$$\gamma = 2(\varepsilon r - \varepsilon d)\sin\theta\cos\theta \tag{26}$$

 ε_r is principle tensile strain perpendicular to the compression strut. ε_d is the diagonal compression strut's strain. Hwang [23], suggested the equation shown below to calculate ε_r [10],

$$\epsilon r + \epsilon d = \epsilon h + \epsilon v$$
 (27)

where ε_h is the horizontal tie's normal strain, ε_v is the vertical tie's normal strain. According to Hwang and Lee [22] ε_v is considered to be 0.002. Hwang [24] suggested ε_h and provided by [10],

$$\epsilon h = \frac{Fh}{Af Ef} \le \frac{fp}{Ef}$$
(28)

$$Fh = \gamma h V / tan\theta$$
⁽²⁹⁾

$$V = P/2 \tag{30}$$

 ε_d from Equation (27) suggested by Zhang and Hsu [26] and is determined by [10],

$$\varepsilon d = -\xi \varepsilon \tag{31}$$

3.4. Calculation of the deflection caused by shear (Δs)

This proposed study [10] makes modifications to the bilinear model that was originally put forward in CP 110 [27].

 $\Delta f = \Delta f 1 + \Delta f 2 \tag{32}$

$$\Delta f1 = \frac{\beta I^{2} 2 M}{\text{Ec Ig}}; \text{ when } 0 < M \le \text{Mcr}$$
(33)

where I is beam span, M is beam moment.

$$\Delta_{f2} = \begin{cases} \frac{\beta I2 (M-Mcr)}{kf Ec leff}; \text{ when } M_{cr} < M < M_{u} \\\\ \frac{\beta I2 (M-Mcr)}{kf Ec lcr}; \text{ when } M_{u} = M \end{cases}$$
(34)

where I_{cr} cracked area's moment of inertia.

$$\beta = 1/24[3 - 4(a/I)2] \tag{35}$$

$$M = \frac{P}{2}a \quad \text{and} \quad Mcr = \frac{Pcr}{2}a \tag{36}$$

To reduce bar pullout that would result in severe beam deformation, the FRP bars in this investigation are anchored at the ends [10]. IS:456 [19] proposed I_{eff} which represents efficient moment of inertia of the beam [10],

$$\operatorname{leff} = \frac{\operatorname{Icr}}{1.2 - \frac{\operatorname{Mcr} jd(1-k)}{M} d} \text{ where Icr} \le \operatorname{Ieff} \le \operatorname{Ig}$$
(37)

IS:456 [25] suggested I_{cr} moment of the broken concrete portion [10],

$$Icr = \frac{b(kd)^{3}}{3} + (m-1)A'f(kd - d')^{2} + mAf(d - kd)^{2}$$
(38)

4. Experimental program

Experimental details regarding the samples used in the database, sourced from reference [10], are provided in this chapter as follows:

By altering the ratio of reinforcement throughout the were fabricated and evaluated using a four-point testing method. Figure 2 (the datas presented in this figure are sourced from article number [10] in the literature) provides the cross-sectional schematic, beam reinforcement details, and test setup. Table 1 (the datas presented in this table are sourced from article number [10] in the literature) includes information about the beams [10].

				Iat	IC I . U	peeme			cst bui	3[10]				
Authors	Beam ID	Type of FRP	I (mm)	b (mm)	d (mm)	D (mm)	a/d	I _b (mm)	ρ _f (%)	E _f (Gpa)	f _p (Mpa)	ε _{fu} (%)	E _c (Gpa)	f' _c (Mpa)
Present Study	G6/0.50	GFRP	990	170	416	500	0.50	50	1.70	41,0	655	1.54	35.9	58.5
	G6/0.75	GFRP	990	170	416	500	0.75	50	1.70	40,0	680	1.53	36.1	59.0
	G6/1.0	GFRP	990	170	416	500	1.00	50	1.70	39,0	650	1.56	35.8	58.0
	G4/0.5	GFRP	990	170	416	500	0.50	50	1.14	42,0	640	1.52	35.6	57.5
	G4/0.75	GFRP	990	170	416	500	0.75	50	1.14	41,8	660	1.55	35.8	58.0
	G4/1.0	GFRP	990	170	416	500	1.00	50	1.14	41,0	645	1.57	36.4	60.0

Table 1: Specifications of the test bars [10]

The datas presented in this table are sourced from article number [10] in the literature.

The beams were cast, cured with wet burlap for 28 days, evaluated using a digital beam 1000 kN with a four - point loading setup with 25 kN increments at a 0.250 kN/s rate. The loads were measured with a load cell, deflection by dial gauges, and strain in the FRP bars with electrical strain gauges at mid-span. Concrete strain was measured by demec gauges. Testing data was recorded through a multi-channel system, which captured load and mid-span deflection; reports included the final phase loads and initial cracks. Figures 3 (a) to (d) provide images of the construction phases and beam testing [10].



Figure 2: Information about the test set-up and test beam [10]



(a)Reinforcement cage of the beam





(c)End anchorage of the longitudinal bars

zone



(d)Position of Location of Dial gauges

Figure 3: Construction phases of the testing beams [10]

5. Discussion the results of experimental program

The datas presented in this section are sourced from article [10] in references.

Deformations were seen to be gradual during the first phases of load in all six beams. Response of deflection of the broken beam is discovered to be nonlinear throughout the succeeding loading stages. As compared to beams with four longitudinal bars, the longitudinal bars of the six-bar beams have a smaller deflection of middle span. For beams with a lower ratio of a/d, the deflection of mid-span discovered as smaller. At the beam's tension face, fractures first appeared. Later steps in the loading process, it was seen that the diagonal crack's breadth increased. The transverse shear caused the beams to fail. The reduction in the shear span to depth (a/d) ratio was shown to greatly boost the GFRP beam's load carrying capability. With increasing (a/d) ratio, it was discovered that the mid span deflection was increasing as well. Figure 4 displays beam cracks at the point of fail. All of the study's specimens experienced a similar failure mechanism [10].



Figure 4: Testing beams' cracking model and fail mechanism [10]

6. Estimated and experimental test values analysis

The datas presented in this section are sourced from article [10] in references.

Table 2 (the datas presented in this table are sourced from article number [10] in the literature) compares predicted and experimental loads at initial cracking and final stages. The mean ratio of experimental to predicted strength ($P_{cr,e}/P_{cr,p}$) is 0.99 at initial cracking (variation coefficient 7.07%) and 1.13 at the final stage (variation coefficient 3.54%). The proposed study [10] accurately estimates both ultimate (final) stages and first cracking load.

Table 2: Comparing testing sample's estimated and experimental loads at the first step of cracking phase and ultimate (final) phase [10]

			At first Cra	cking stag	e	At ultimat	e stage		
Authors	Beam ID	Type of FRP	P _{cr,e} (kN)	P _{cr,p} (kN)	P _{cr,e} /P _{cr,p}	P _{u,e} (kN)	P _{u,p} (kN)	P _{u.e} /P _{u,p}	Type of Failure
Present Study	G6/0.50	GFRP	250	233	1.07	900	757	1.19	D.S.
	G6/0.75	GFRP	170	183	0.93	550	508	1.08	D.S.
	G6/1.0	GFRP	130	136	0.96	460	404	1.14	D.S.
	G4/0.5	GFRP	250	231	1.08	760	681	1.12	D.S.
	G4/0.75	GFRP	170	181	0.94	520	457	1.14	D.S.
	G4/1.0	GFRP	130	138	0.94	410	371	1.11	D.S.
Mean					0.99			1.13	
S.D.					0.07			0.04	
CoV (%)					7.07			3.54	

The datas presented in this table are sourced from article number [10] in the literature.

Table 3 (the datas presented in this table are sourced from article number [10] in the literature) compares anticipated and empirical deflections at initial cracking and ultimate stages. The ratio of experimental to predicted deflection ($\Delta_{cr,e}/\Delta_{cr,p}$) at initial cracking is 0.75 with a CoV of 6.67%. At the ultimate stage, the ratio ($\Delta_{u,e}/\Delta_{u,p}$) is 0.88 with a CoV of 5.68%. These results indicate the proposed study [10] accurately estimates deflections at both stages.

Table 3: Testing sample's deflections of estimated and experimental at initial stage of cracking and at the ultimate (final) stage [10]

			At first Crac	king stage	, 0	At ultimate	stage		
Authors	Beam ID	Type of FRP	Δ _{cr,e} (mm)	$\Delta_{\rm cr,p}$ (mm)	$\Delta_{\rm cr,e}/\Delta_{\rm cr,p}$	Δ _{u,e} (mm)	$\Delta_{u,p}$ (mm)	$\Delta_{u.e}/\Delta_{u,p}$	Type of Failure
Present Study	G6/0.50	GFRP	0.41	0.50	0.82	3.10	3.40	0.91	D.S
	G6/0.75	GFRP	0.46	0.66	0.70	3.21	3.94	0.81	D.S
	G6/1.0	GFRP	0.51	0.71	0.72	3.62	4.37	0.83	D.S
	G4/0.5	GFRP	0.51	0.63	0.81	3.51	3.95	0.89	D.S
	G4/0.75	GFRP	0.58	0.79	0.73	4.11	4.43	0.93	D.S
	G4/1.0	GFRP	0.62	0.85	0.73	4.32	4.88	0.89	D.S
Mean					0.75			0.88	
S.D.					0.05			0.05	
CoV (%)					6.67			5.68	

The datas presented in this table are sourced from article number [10] in the literature.

The proposed model [10] was used to project 53 beams' load and deflection. It is possible to estimate 53 FRP-RC deep beams' strength via studies from literature [28,29,30,31,32] and with the help of study called as 'strut and tie' which suggested from ACI 318 [33]. 53 FRP-RC beams' experimental and predicted strengths are contrasted in Table 4 (the datas presented in this table are sourced from article number [10] in the literature). By a CoV of 36.3%, the average value of ($P_{u,e}/P_{u,p}$) which represents experimental to

estimated ultimate (final) load for 53 pieces of beams was determined as 0.89, which is consistent with the model suggested by ACI-318 [33]. Using the models suggested by [28-32] it is discovered that mean (average) value of the ratio of the experimental to the estimated ultimate (final) load ($P_{u,e}/P_{u,p}$) is moderate. When proposed model [10] was used to forecast the ($P_{u,e}/P_{u,p}$) ratio, it was discovered that the mean value of 53 beams was 1.05, with a coefficient of variation of 29.5%.

Tables 5 and 6 (the datas presented in these tables are sourced from article number [10] in the literature) compares the deflection of 53 pieces of FRP reinforced concrete beams' final stages via empirical and estimated data from different publications [34, 35, 36, 37, 38, 39] and the current codes [28, 32, 40, 41].

For 53 beams the proposed model [10] was found to have a CoV 40.80% and a value of mean as 1.03 for empirical to the estimated deflection ratio $(\Delta_{u,e}/\Delta_{u,p})$ at final stage. It was discovered that the value of $\Delta_{u,e}/\Delta_{u,p}$ was varying 0.340 to 2.140. Value of ratio $\Delta_{u,e}/\Delta_{u,p}$ was determined for amount of 34 beams, to be lower than 1.0 with a ratio of a/d below 1.00 out of 53 test data utilized in this investigation. This suggests that when a/d ratio is lower than 1.00, the deflection is overstated by the proposed study [10]. This could be because the arching effect has a reducing effect on bending and shearing-related deformation.

In table 5 (the datas presented in this table are sourced from article number [10] in the literature) the mean 1.03, that matches with the proposed study [10], is lower than the mean of $(\Delta_{u,e}/\Delta_{u,p})$ for other models [34, 35, 36, 37, 38, 39] which was found to be in the range of 1.28 to 2.04 for those models. The proposed study's [10] CoV of estimation was determined as 40.80%. On the other hand for other studies CoV value is ranging from 27.6% to 33.9%. It was discovered that other studies existing to determine the deflection of FRP RC beams were extremely conservative. In light of this, that may said the proposed model's [10] estimation of final step of FRP deep reinforced concrete beams deflection and strength is comparable to the convenient empirical outcomes.

7. Numerical study modeling

Accurate measurement of ultimate load and deflection is essential for assessing structural condition and determining necessary improvements. This study introduces new formulas for these measurements, developed using scientific approaches and engineering standards from the literature. These formulas aim to provide precise and comprehensive results, contributing to the field. The results will be compared with existing studies, application codes, and the study's predictions, using the symbolic regression method in accordance with Eurocode standards.

7.1. Suggested Formula for Determining Load

For the ultimate load capacity (P_u) , the newly proposed formula is presented below in the Numerical Study Modelling (NSM) section:

$$(Pu) = 0.896 * D* 0.405(a/d) \log \sqrt{0.013 * b} \sqrt{0.013 * b * 0.0624 * \rho f * f p}$$
(39)

where $\rho f\,$ represents the reinforcement ratio of the FRP bars.

Table 7 (the datas presented in this table are sourced from article number [10] in the literature) compares the estimated and experimental ultimate loads of 53 FRP-RC beams using the new formula from the Numerical Study Modelling (NSM) section, current application codes, and existing studies. Additionally, results from Equation 39 for these beams are listed in the 'NSM (Equa. 39)' column in Table 7.

According to the results presented in Table 7; the mean Pu,e/Pu,p ratio for 53 FRP-RC beams is 0.89 with a CoV of 36.3% for ACI-318 [33]. Other studies [28,29,30,31,32], $P_{u,e}/P_{u,p}$ ratios ranging from 1.6 to 5.13, with CoV values of 25.6% to 41.7%. The proposed study's [10] Equation 8 yields a mean ratio of 1.05 with

a CoV of 29.5%. Equation 39 from the NSM section, with a mean ratio of 2.48 and a CoV of 19.57%, offers superior accuracy and reliability, closely aligning with actual structural behavior.

7.2. Suggested Formula for Determining Load

For the ultimate stage total deflection ($\Delta_{u,e}$), the newly proposed formula is presented below in the Numerical Study Modelling (NSM) section:

$$\Delta = \frac{L\sqrt{Ec\sqrt{\frac{98.6*d*L*Ec\sqrt{\frac{D}{(pf)*Ef}}}{b*Ef}}}}{D(f'c)}$$
(40)

Table 8 (the datas presented in this table are sourced from article number [10] in the literature) compares the predicted and experimenta; ultimate loads of 53 FRP-RC beams using the new formula from the Numerical Study Modelling (NSM) section, current application codes, and existing studies. Results from Equation 40 for these beams are also shown in the 'NSM (Equa. 40)' column of Table 8.

According to the results presented in Table 8, the Proposed Study's [10] Equation 1 yields $\Delta u,e/\Delta u,p$ ratio of 1.03 with a CoV of 40.80%. Current codes and studies [28,32,40,41] shows $\Delta u,e/\Delta u,p$ ratio between 1.90 and 2.03, with CoV values from 33% to 34%. Other studies [35,36,37,38,39] report a $\Delta u,e/\Delta u,p$ ratio between 1.28 and 2.04, with CoV values from 32.5% to 33.9%. Equation 40 from the NSM section gives a $\Delta u,e/\Delta u,p$ ratio of 1.04 with a CoV of 26.99%. Equation 40 from the NSM section outperforms existing formulas and studies, proving to be more effective and reliable. Its low CoV value indicates less variability and closer alignment with actual structural behavior, confirming its accuracy.

8. Conclusion

Vertical deflections at the mid span and loading point are similar, indicating uniform deflection along the beam. Experimental results align well with predicted load and deflection of RC deep beams with FRP, confirming model reliability. An increase in beam depth reduces normalized shear stress, showing sensitivity to geometric parameters. During initial breaking, shear deflections account for 89% to 95% of total deflection, while in the final phase, they contribute 42% to 58% of overall displacement, highlighting their significant impact on beam behavior [10].

New formulas (equation 39 and 40) for load and deflection of RC deep beams with FRP proposed in Section 7 were derived using Eureqa, which is a symbolic regression program. They were compared with existing results and this comparison showed that the new formulas better reflect reality, providing more accurate results in structural modeling.

		Thomas & S. Ramadass [10]	1,19	1,08	1,14	1 14	111	1,62	1,36	1,30	1,15	0,98	1,05	1,18	1,29	1,26	1,41	1,03	0,61	76'0	1 37	1.47	1.05	1.09	1,22	1,02	1,13	1,12	0,75	0,55	0,34	0,92	0,75 0.52	0,75	0,76	0,35	0,87	0,64	0.81	0.80	0,83	0,91	0,90	1,23	1,03	1,45	1,33	1,13	1,16	1,39	1,05	0,31	29,5
		CSA [32] Job	1,71	1,05	0,89	1 11	0.87	2,70	2,41	2,64	1,74	1,70	2,07	1,90	1,97	1,73	1,93	1,63	1,10	1,34	1,50	2,28	1.94	1.69	1,86	1,51	1,63	1,55	1,33	1,17	0,80	1,62	1,64	1,55	1,68	1,05	2,14	1,97	1 51	1.10	1,40	1,19	1,42	1,42	1,46	1,73	1,29	1,57	1,73	1,50 1 85	1,60	0,41	25,6
	u,e/Pu,p	ACI 318 [33]	1,33	0,81	0,69	1,14 0.78	950	1,69	1,33	1,42	1,04	0,93	1,05	1,09	1,16	1,08	1,22	76'0	0,59	18,0	0, F	1.12	1.02	0.74	0,98	0,77	1,04	1,00	0,66	0,55	0,28	0,80	0,68	0,69	0,54	0,27	0,68	0,53	66'D	190	0,58	0,77	0,64	0,97	0,70	06'0	1,12	1,90	0,65	15'0	0,89	0,32	36,3
	-	ISIS [28]	9,18	5,66	4,83	5,7R	4.13	5,87	6,41	3,95	4,19	3,05	2,71	3,72	4,12	3,34	4,27	2,69	1,33	2,43 2,93	2 0K	4.44	3.48	3.21	4,08	1,85	2,29	8,89	4,77	2,58	1,63	7,61	4,83 2.56	4,82	4,82	1,72	6,42	3,73	CA 5	2.22	3,64	2,66	4,07	4,24	5,59	4,27	3,76	4,44	5,60	5,75 CA A	4,21	1,76	41,7
		NRC [31]	7,7	4,74	4,05	cc', 5	1 10 10	6,50	7,10	4,38	4,28	3,12	2,77	3,67	3,92	3,44	4,37	2,75	1,36	65'7	60 F	4 20	3.29	4.05	4,49	2,65	3,08	6,87	3,71	2,01	1,27	6,88	4,35 2.31	3,97	3,98	1,56	6,53	3,82	3 34	1.92	3,14	2,07	3,17	3,66	4,83	3,32	2,98	3,94	4,19	4,30 5.66	3,91	1,54	39,4
		BISE [30]	8,08	4,97	4 T	5 37	4.17	7,39	8,12	5,01	5,24	3,81	3,39	4,22	4,33	3,99	5,70	65 I	1,77	95'7	4 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	4.73	3.96	4.84	5,13	4,35	4,57	6,81	3,76	2,00	1,36	6,52	4,12 2,19	3,87	4,21	1,61	6,88	4 10 10	4C'7	2.37	3,17	2,55	3,19	4,52	4,88	3,72	3,62	4,75	3,84	4,34 5 87	4,34	1,57	36,2
		JSCE [29]	10.09	6.21	5.24	6.61	5.75	8.55	9.40	5.80	6.07	4.41	4.90	4.90	5.04	4.62	6.61	4.16	2.06	5.41	4.38	5.48	4.59	5.71	6.04	5.04	5.29	7.88	4.35	2.31	1.76	7.54	4.76 2.54	4.48	5.48	2.12	8.24	4.77	408	2.74	3.67	2.95	3.69	5.23	5.64	4.77	5.12	6.73	3.72	5.50	5.13	1.88	36.6
	Ι	P _{use} (kN)	006	550	460	0025	410	2687	3000	1849	272,1	197,9	176	242	267,9	268,5	338,5	213,1	105,3	2/761	0,200 700 R	2,912	209.7	1447	1906	1191	1601	814	471	243	192	1273	431	830	1062	376	2269	1324		965	350	467	392	744	538	185,2	298,1	468,2	135,5	243,1			
		f _a (Mpa)	655	680	650	049	589	001	1000	1000	1826,9	1826,9	1826,9	1826,9	1826,9	1826,9	1955,8	1955,8	1955,8	8,CCEL	1955.8	1826.9	1955.8	790	750	1596	1899	709	607	709	602	765	765	709	709	765	938	938	776	1036	776	1036	776	1036	776	1180	1180	1180	690	655	}		
[10]		E _r (Gpa)	41	40,0	39,0	42,U 41.R	41.0	66,4	66,4	66,4	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6	120,2	120,2	120,2	7/071	120.2	80.6	120.2	47.6	51,9	120	144	41,1	41,1	41,1	41,1	37,9	37,9	41,1	41,1	37,9	42,3	42,3	13.0	143.0	43,0	143,0	43,0	143,0	43,0	134,0	134,0	134,0	40,8	40,8 40,8	-		
		P ₁ (%)	1.7	1.7	11	1 14	1 14	121	1.21	1.21	0.38	0.38	0.38	0.51	0.64	0.51	0.38	0.38	0.38	15.0	50	0.50	0.50	0.69	1.24	0.26	0.46	1.49	1.47	1.47	1.47	17	11	2.13	2.12	1.7	1.58	1.56	0.78	1.24	1.24	1.71	1.71	1.24	1.24	113	1.35	1.21	1.29	1.39	1		
		(edM)	58,5	29	2 28	c'/c 85	1 8	32	38,7	38,7	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1 26.4	70/1	26.1 26.1	26.1	26.1	49.3	49,3	38,7	38,7	40,2	45,4	41,3	64,6	40,5	39,9 41.2	40,7	66,4	68,5	51,6	50,7	5 U 2	40.5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	34,7	41,7	37,6	35,5 ::	42	ł		
		* (mm)	20	8	8 8	2 S	; ;	228	228	228	100	100	100	10 10	ğ	<u>8</u>	<u>ş</u> :	<u>8</u> 1	<u>8</u>	a \$	<u>a</u> 5	ġ	ğ	228	228	228	228	100	<u>6</u>	<u>6</u>	<u>ş</u> :	20	8 8	500	200	200	330	330	a 5	8	100	100	10	<u>6</u>	0 <u>1</u>	2	8	8	នះ	S 2	2		
		(mm)	20	20	S 3	R 8	8 9	8 20	203	203	100	100	100	10	<u>6</u>	0 <u>1</u>	<u>ş</u> :	<u>8</u>	8	8		i și	9	130	130	130	130	100	6	100	ŝ	50	8 8	200	200	200	330	330	a a	9	100	100	100	9	0 <u>1</u>	20	2	ß	S 1	S 2	2		
	_	a/d	0,5	0,75	8,1	0 75 0	001	1,15	0,83	1,47	1,40	1,70	2,10	1,70	1,70	1,70	1,40	1,70	2,10	0, t	1 20	1.70	1.70	1.14	1,15	1,13	1,13	1,07	1,44	2,02	2,02	1,08	1,48 2.07	1,48	1,48	2,06	1,10	1,49	1 60	1.69	1,69	1,69	1,69	1,30	1,30	1,55	1,41	1,36	1,55	1,41 * 35			
	_	d (mm)	416	416	416	416	416	1088	1088	1088	250	250	250	250	250	310	550	550	7 29	20	00 P	Ē	061	1097	1088	1111	1106	257	261	261	261	203	202	496	497	505	889	891 375	375	326	326	326	326	326	326	150	250	350	51	250	2		
		b (mm)	170	170	6	12	12	2 0 <u>0</u>	300	300	200	200	200	200	200	200	8	8	8	8		002	802	8	300	300	300	310	310	310	310	8	88	905	300	300	301			250	250	250	250	250	250	150	150	150	51	150	3		
		Type of FRP rebar	GFRP	GFRP	GFRP	GERP	GFBD	GFRP	GFRP	GFRP	AFRP	AFRP	AFRP	AFRP	AFRP	AFRP	CFRP	CFRP	CFRP	CERP	CERP	AFRP	CFRP	GFRP	GFRP	CFRP	CFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GEDD	CFRP	GFRP	CFRP	GFRP	CFRP	GFRP	CFRP	CFRP	CFRP	GFRP	GFRP	12 2		
		Beam ID	G6/0.5 [4]	G6/0.75 [4]	G6/1.0 [4]	G4/0.5 [4]	64/1.0 [4]	G1.13 [48]	G0.83 [48]	G1.47 [48]	A3D9M-1.4 [45]	A3D9M-1.7 [45]	A3D9M-2.1 [45]	A4D9M-1.7 [45]	A5D9M-1.7 [45]	A5D9L-1.7 [45]	C3D9M-1.4 [45]	C3D9M-1./ [45]	C3D9M-2.1 [45]	CEDOM 1.7 [45]	C5D91_1_7_[45]	A3D95-1.7 [45]	C3D9S-1.7 [45]	G8N6 [42]	G8N8 [42]	C12N3 [42]	C12N4 [42]	A1N [44]	A2N [44]	A3N [44]	A4H [44]	B1N [44]	B2N [44] B3N [44]	B4N [44]	B5H [44]	B6H [44]	C1N [44]	C2N [44]	G-0.7/1.6 [41]	C-1.2/1.6 [41]	G-1.2/1.6 [41]	C-1.7/1.6 [41]	G-1.7/1.6 [41]	C-1.2/1.3 [41]	G-1.2/1.3 [41]	CF-B-1 [39]	CF-d-250 [39]	CF-d-350 [39]	F-B-1 [39]	F-d-250 [37] F-4 350 [39]	[and non-re-		
		SI.No.	1								9	1	2	5	4	5	9			n c				4	5	9	5	8	9	8		2	m 1	5	9	1	5		2 5		2	4	5	9	5	9	9	0	1		Vean	07	No.

5	d la	9 (%) 7	(MPa) E,	(Gpa) Er	(Gpa) 1, (Mpa) P	(kN) A.	(mm) Benm	krane [100] V	ost et al. [101] Ra	ifi & Nadjai (102) 6	ischoff & Gross [103]	4dam et al. [104]	Kumar (99) Jo	b Thomas & S. Ramad A A4
4		1	C'0	7 F 4	n'it			1.5	1,44 1 75	1,8U	1,94 7 A5	1,00 7 36	1,65	1 15	160
1.11			5 S	5.8	9°0	1 4	1 10	1 13	1.95	2,45	2.62	2.59	1.68	1.04	0.83
4	4	-1	17,5 E	35,6 4	12,0 6	540	60 3	51	1,51	1,91	1,95	1,94	1,30	1,06	0,89
4	Ħ,		58	5,8 4	11,8 6	60 5	520	Ħ	1,85	2,35	2,42	2,42	1,62	1,22	6,03
4,	ដ្ រ		8 6	6,4 9 6 4	1,0	42 42	9	E c	2,07	2,60	2,67	2,75	1,76	1,07	68,0
	រុ ក	."	18	0,0	56.4 II		100	7 4	2 44	2,54 7 Q5	4,44 2,05	8 8	1 87	1 40	1,0/
	្រុ		8.7	19,2 6	56.4 10	1000	349 2	9.1	2,88	3,48	3,50	3,54	2,17	1,61	1,64
	38		16,1	24 8	30,6 181	26,9 27	72,1 1	8,2	0,86	1,05	1,04	1,05	0,67	0,97	0,80
60	38		16,1	24 8	30,6 18;	26,9 19	Z 6'1t	1,74	1,27	1,57	1,55	1,57	1,02	1,28	1,00
69	88	1	16,1	24 8	30,6 187	26,9 1	76 3	4,5	1,87	2,29	2,25	2,30	1,46	1,60	1,56
	5		6,1	24 8	30,6 18.	26,9 2	342 2	6,8	1,55	1,89	1,85	1,90	1,19	1,63	1,47
.	8.5	- 1 T	1 2	2 2	30,6 4 15	26,9 26	57,9 I	98	8, 1	1,20	1,17	1,21	0,74	1,08	1,02
	1.8	10 C 10 C	1'9	4 F	101 D T T T	70,9	1 1		1,40	1,12	1,12	e 11/1	1,11	5/1 7 ¥	101
9 m 9 0					20.7 10	21 0/22 24 24	1 1 1 1 1 1	2 6	0.05	1 10	1 07	1 20	50 ⁴ 0	104	1) SU
) ×	a a a a a a a a a a a a a a a a a a a	Ì۲		24	20.7 10	55.8 10	10	2	1 78	1 66	1 53	167	1 13	1 14	0.61
1 26.1	51 26.1	19		24 1	20.2 19	55.8 19	22	8	1.30	1.59	1.45	162	191	1.46	76'0
4 261	64 261	i g		74	20.7 19	55.8 30	13 13	6	136	163	1 46	165	80	1 58	151
1 26.1	51 26.1	1.92		24 1	20.2	55.8 29	10.8	99	1.81	2.18	1.96	2.22	1.34	1.66	1.70
0 26,1	50 26,1	26,1		24 8	30,6 18;	26,9 21	19,2 21	1,28	0,98	1,19	1,16	1,19	0,74	06'0	06'0
0 26.1	(50 26.1	26.1		24 1	20.2	55.8 20	11 19.7	134	0.91	1,10	0,99	1,11	0.68	1,20	0,80
9 49,3	,69 49,3	5		33	17,6 7	14	447 1	2,4	1,38	1,71	1,74	1,80	1,09	0,79	0,73
4 49,3	,24 49,3	9		33	51,9 7	19 19	906	2	1,65	2,00	2,07	2,11	1,25	0,97	0,87
6 38,7	,26 38,7	38,7		2,2	120 15	596 11	191	8,6	1,28	1,63	1,38	1,70	0,99	0,72	0,61
6 38,7	,46 38,7	38,7		2,9,2	144 18	899 16	501	8	1,71	2,10	1,80	2,20	1,30	0,98	0,79
9 40,2	,49 40,2	2 2		2	11,1	8 60	114	2,4	1,51	1,81	1,92	1,85	1,1	1,70	1,12
7 45,4	,47 45,4	45,4		5,9	11,1	60		5,1	1,31	1,58	1,69	1,64	8,1	1,39	0,69
7 41,3	,47 41,3	7		4,2	1,1	5	9 I	6, 1	1,21	1,50	1,62	1,57	5	1,16	0,49
	,4/ 04,0	g s		c, 2	1,1	50 59 F	76	a :	6 1 ×	1,/1 1 FE	1,8/	7,60	57 T	/7/1	0,34
1 39.9	71 39,9	9.9		9.7	7 9.78	65	1	1,5	1.51	1.86	2.04	1.90	125	1.26	0.71
1 41,	71 41,	글		30,2	57,9 7	65 4	31 1	5,3	1,46	1,88	2,13	1,92	1,42	1,13	0,53
3 40	,13 40	8	2	9,9 4	11,1 7	8 60	1 05	1,5	1,59	1,94	2,09	2,00	1,27	1,39	0,74
2 66,	,12 66,	S.	4	8,3	11,1 7	01	062	4,2	1,63	1,98	2,11	2,05	1,26	1,38	0,78
68	1,7 68	8	ς.	6,8	37,9 7	.65	1 1 1	2,9	1,65	2,29	2,62	2,37	2,03	1,12	0,38
8 1	55 51 51 51 51	5 5	ر ب	8,5	5,3	88	269	5,9	1,94	2,35	2,51	2,41	1,49	4, r	0,84
a e		ζ, s			2 VE V 40				1.75	2 42	1 81	775 26 C	ł :	j ;	0,05
8 40.5	78 40.5	19			202	1 10	20	1.6	1.37	1.69	1.70	11	1,12	1,11	0.81
4 40,5	24 40.5	0		1 9,9	43,0 10	30	6	. 10	1.79	2,17	1,86	2,26	1,32	1,89	96'0
4 40,5	,24 40,5	0,5		6,9	13,0 7	76 3	120	12	1,26	1,55	1,67	1,59	1,04	1,10	0,76
1 40,5	,71 40,5	5,5	-1	1 9,9	43,0 10	036 4	167	5	1,44	1,74	1,49	1,79	1,05	1,59	0,85
1 40,5	,71 40,5	40,5	-	9,9 4	13,0 7	76 3	192	12	1,43	1,75	1,89	1,80	1,16	1,32	0,92
4 40,5	,24 40,5	5 ⁽)5	1	1 9,9	43,0 10	036 7.	744 1	0,6	1,51	1,80	1,55	1,84	1,08	1,90	1,28
4 40,5	,24 40,5	5,0	1	6,9	13,0 7	76 5	138 1	3,7	1,12	1,36	1,45	1,38	0,88	1,19	0,86
3 34,7	,13 34,7	14,7		1 1/1	34,0 11	180 18	35,2 8	3,8	1,31	1,58	1,38	1,60	96'0	1,81	1,59
5 41,7	,35 41,7	11		80,4 1	34,0 11	180 29	18,1	60	2,96	3,56	3,10	3,62	2,14	2,47	2,08
1 37	,21 37		9	8,8 1	34,0 11	180 46	58,2	2	3,87	4,62	4,02	4,71	2,78	2,57	2,14
6	.29 33	0.00	5.5	28 4	10.8 6	13	15.5	14	1.33	1,62	1,75	1,64	1,06	1,50	1,34
	ß		4	0.5	10.8 6	55 24	15	5	2.33	2.81	2.99	2.88	1.75	1.82	2,04
4	24		48	2,6 4	10,8 6	55 42	12.5	8	1,99	2,39	2,53	2,45	1,45	0,91	1,63
									1,62	1,98	1,97	2,04	1,28	1,34	1,03
									0,55	0,66	0,64	0,68	0,42	0,37	0,42

	Job Thomas & S. Ramadass [4]	0,91	0,81	0,83	0,89	0.89	1,67	1,13	1,64	0,8	1,00	1,56	1,47	1,02	1 6	0.80	0,61	0,94	1,51	1,70	06'0	0,80	5, () 1 ()	0,87	19,0 070	5/50 5 # #	1,12	040	0,34	0,70	0,71	0,53	0,74	0,78	97 0 84	0.66	0,95	0,81	0,96 200	0,76	(a) (a)	0,92 1.28	0,86	1,59	2,08	2,14	1,34	4 83 7	1,03	0,42	40,8
/A _{u.P}	ACI 440.1R-15 [106]	1,82	2,26	2,57	1,84	2.65	3,03	3,07	3,59	1,05	1,57	2,31	1,90	17 17	1 00	1.20	1,65	1,62	1,65	2,23	1,19	1,11	1,79	51,2	1,0/L	7777	1,60	4 4	1,80	1,69	1,91	1,91	2,01	2,06	2.43	2,27	2,23	1,70	2,27	84'T	5/'T	1,84	1,38	1,60	3,65	4,77	1,6	2,91 7 51	2,03	0,69	33,99
Δue	CAN/CSA-12 [98]	1,67	2,03	2,29	1,63 7 M	232	2,93	2,92	3,42	1,02	1,50	2,21	1,85	1,18	1.05	1.16	1,51	1,55	1,62	2,16	1,16	1,08	1,59	1,9/	1,48	50 V	1,50	1 43	1,60	1,62	1,79	1,73	1,89	1,94	2.31	2,10	2,09	1,57	2,15	1,47	5/1	1,70	1,32	1,56	3,54	4,62	1,55	0/'7 2 22	1,90	0,66	34,7
	ISIS-07 [94	1,75	2,14	2,37	1,76	2.41	2,95	2,96	3,46	1,04	1,53	2,25	1,87	1,20	101	1.18	1,56	1,58	1,63	2,18	1,17	1,10	1,6	5, 5	2	5	1 50	1 48	17.1	1,64	1,83	1,78	1,93	1,97	2.35	2.14	2,14	1,61	2,19	5	2 F	1,/3	1,34	1,58	3,57	4,65	1,59	2'7 2 30	1,95	0,66	33,9
	ACI 440.1R-06 [105]	1,85	2,34	2,50	1,87	2.54	2,95	2,96	3,50	1,07	1,60	2,32	1,92	1, 1, 1, 1,	1.08	1.19	1,68	1,61	1,64	2,19	1,20	1,11	1,67	2,00	16,1 80 C	20 ⁽⁷	1,82	1 54	1,79	1,69	1,93	2,03	1,99	2,01	2,30	22	2,09	1,71	2,16	1,60	1,/4	1,80	1,38	1,58	3,54	4,62	1,66	2,83 7 30	2,00	0,66	33,0
	Δ (mm)	3,1	3,21	3,62	3,51	4.32	2	10,7	29,1	18,2	22,74	34,5	26,8	15,86	16 QR	13.62	10,04	12,98	18,02	16,66	28,28	18,34	12,4	2	x, c	a (11 3	001	9,5	9,1	13,1	15,3	11,5	14,2	15.9	18,3	6'6	17,6	œ !	3 (n; ;	10.6	13,7	8,8	80	7,2	4 :	7 82	24.		
	P (kN)	8	550	460	760	1 55	2687	3000	1849	272,1	197,9	176	242	267,9	338.5	213.1	105,3	192,2	302,8	290,8	2,912	209,7	1447	9061	ISII I	1001	474	242	192	1273	799	431	830	1062	2769	1324	359	329	390	ត្ត ផ	4 4	744	538	185,2	298,1	468,2	135,5	1,545			
	f _o (Mpa)	655	680	650	9 9	3	1000	1000	1000	1826,9	1826,9	1826,9	1826,9	1826,9	1055 R	1955.8	1955,8	1955,8	1955,8	1955,8	1826,9	1955,8	96 1	2	961	6601 500	50 GQL	e e	209	765	765	765	602	60/ 39/	850	856	1036	776	1036	9/1		1036	776	1180	1180	1180	69	8 8			
	Er (Gpa)	41,0	40,0	39,0	42,0	41.0	66,4	66,4	66,4	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6 80,6	120.7	120.2	120,2	120,2	120,2	120,2	80,6	120,2	47,6	6'TC		4	41,1	411	41,1	37,9	37,9	37,9	41,1	41,1	6/17 8/28	42.3	143,0	43,0	143,0	43,0	145,0	43,0 143.0	43,0	134,0	134,0	134,0	40,8	40'8 V0 8	1		
	Ec (Gpa)	35,9	36,1	35,8	35,6 35,6	36.4	28,6	29,2	59,2	24	24	24	24	54	1 2	7	54	24	24	24	54	24	# 1	8		zi P	3 2	C 92	22,5	29,9	29,7	30,2	29,9	38,3	5'97 8 22	33.5	29,9	29,9	29,9	6 62 6	6'67 6	5 ⁶ 67	29,9	27,72	30,4	28,8	28	ς,05 Α.C5	ł		
	f _c (MPa)	58,5	23	8	57,5 58	8	37	38,7	38,7	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	76.1 76.1	26.1	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	49,3	49,5	38,/	38,/	40,4	t 17	64,6	40,5	39,9	41,2	40,7	66,4	51.6	50.7	40,5	40,5	40,5	τ(04 τ	c,04 c, c,	40,5 40.5	40,5	34,7	41,7	37,6	35,5	47 78	1		
	p ₁ (%)	1,7	1,7	1,7	1,14	1.14	1,21	1,21	1,21	0,38	0,38	0,38	0,51	0,64	10,0	0.38	0,38	0,51	0,64	0,51	0,50	0,50	69'0	1,24	97'n	₽°,	1,49	1 47	1,47	1,7	1,71	1,71	2,13	2,12	1.58	1.56	0,78	0,78	1,24	5,7		1,71	1,24	1,13	1,35	1,21	1,29	45'T	1		
	a/d	0,50	0,75	1,00	0,50	10,1	1,15	0,83	1,47	1,40	1,70	2,10	1,70	1,70	1 40	172	2,10	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,14	1 1	1 :	1 : 1 :	1 44	1 6	2,02	1,08	5 1,48	2,07	1,48	1,48	1.10	1.49	1,69	1,69	1,69	1,09	1,09	1,50	1,30	1,55	1,41	1,36	1,55	1,41	ł		
	r (mm)	066	066	066	066	066	3005	2300	3700	1500	1500	1500	150	1500	1 5	1500	1500	1500	1500	1500	1500	150	ŏ,				175	1 1	1552	1590	1986	2580	191	1971 1971	244	315	1600	1600	1600			160(1600	950	950	950	950	029			
	D (mm)	20	500	202	8 8 8	9 9 9	3 1200	3 1200	3 1200	290	290	290	290	290		1 95	290	290	290	350	330	23	1200	1200		0071 O	310	15	310	608	909	607	99	607	1001	1005	400	400	64 1	8 S	₿ 8	04	40	200	300	<u>6</u>	8	8 8)		
	(mm) p	416	416	416	416	416	108	108	108	250	250	250	250	250	050	32	250	250	250	310	190	190	109	108			() 2	761	261	503	501	502	496	497		891	326	326	326	2	52	326	326	150	250	350	5	2			
	p (mm)	170	170	51	51 5	1 5	30	300	õ	20	20	20	ŝ	8 8	3 2	2	20	20	200	200	20	ŝ	×,				10	1 2	310	300	300	õ	₿ i	8 8		Q	250	25	52	2	2	2 2	250	150	150	51	2 2	ų į			
	Type of FRP rebar	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	AFRP	AFRP	AFRP	AFRP	AFRP	CERP	CFRP	CFRP	CFRP	CFRP	CFRP	AFRP	CFRP	GFRP	GFRP	CrkP	CERP	GFED	CFDD	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFBP	GFRP	CFRP	GFRP	CFRP	GFRP	CFRP	GFRP CFRP	GFRP	CFRP	CFRP	CFRP	GFRP	GEBD			
	Beam ID	G6/0.5 [4]	G6/0.75 [4]	G6/1.0 [4]	G4/0.5 [4] G4/0.75 [4]	G4/1.0 [4]	G1.13 [48]	G0.83 [48]	G1.47 [48]	A3D9M-1.4 [45]	A3D9M-1.7 [45]	A3D9M-2.1 [45]	A4D9M-1.7 [45]	A5D9M-1.7 [45]	C3D9M-1.4 [45]	C3D9M-1.7 [45]	C3D9M-2.1 [45]	C4D9M-1.7 [45]	CSD9M-1.7 [45]	C5D9L-1.7 [45]	A3D9S-1.7 [45]	C3D9S-1.7 [45]	G8N6 [42]	GBN8 [42]	C12N3 [42]	C12N4 [42]	AIN [44]	A3N [44]	A4H [44]	B1N [44]	B2N [44]	B3N [44]	B4N [44]	B5H [44] D2U 1441	C1N [44]	C2N [44]	C-0.7/1.6 [41]	G-0.7/1.6 [41]	C-1.2/1.6 [41]	G-1.2/1.6 [41]	C-T://T/0 [#T]	C-1.2/1.3 [41]	G-1.2/1.3 [41]	CF-B-1 [39]	CF-d-250 [39]	CF-d-350 [39]	F-B-1 [39]	F-d-250 [37]	fool opport		
	SI.No.	t.	2	m	4 4	9 10	7	60	0	9	Ħ	11	9	41 4	a te	1	18	19	20	21	22	R	R ;	a ;	9 F	17	8 2	1 5	H	32	R	34	5	8 5	÷ ۳	8	40	41	4	4:	4:	4 4	47	48	49	2	5	7 8	Mean	S.D	780

																			hu,e/	d'n		
leam ID Type of FRP rebar b (mm) d (mm) D (mm) L(mm)	Type of FRP rebar b (mm) d (mm) D (mm)	b (mm) d (mm) D (mm) L(mm)	d (mm) D (mm) L(mm)	D (mm) L(mm)	L(mm)		(a/d)	b ₁ (%) F _c (MPa) Ec (Gpa) E ₁ (Gpa) f _a ((Mpa) P _u	(IAN) NSN	A (equa. 39)	ISCE [95]	BISE [96]	NRC [97]	ISIS [94]	ACI 318 [43]	CSA [98]	Job Thomas & S. Ramadass [4]	Pu, NSM
36/0.5 [4] GFRP 170 416 500 990	GFRP 170 416 500 990	170 416 500 990	416 500 990	200 990	066		5,0	1,7 5	8,5 3.	5,9 4	41 6	555 9	8	407,86	10.09	80'8	ĽL	9,18	1,33	1,71	1,19	2,21
76/0.75 [4] GFRP 170 416 500 990 (GFRP 170 416 500 990 (170 416 500 990 (416 500 990 (200 990 (066	~	75	1,7	59 3(6,1 4	t0	5 080	50	331,55	6.21	4,97	4,74	5,66	0,81	1,05	1,08	1,66
76/1.0 [4] GFRP 170 416 500 990	GFRP 170 416 500 990	170 416 500 990	416 500 990	200 990	066		_	1,7	28	5.8	6	550 4	09	258,61	5.24	4,21	4,05	4,83	0,69	0,89	1,14	1,78
74/0.5 [4] GFRP 170 416 500 990 0.5	GFRP 170 416 500 990 0,5	170 416 500 990 0,5	416 500 990 0,5	2'0 066 005	5,0 069	5		1,14 5	E 51	5,6	2	540	9	330,15	59.6	7,78	7,35	7,74	1,14	1,62	1,12	2,30
d=/v./5[=] GFRP 1/0 416 500 990 0./5 14/1.0[4] GFRP 170 416 500 990 1	GHRP 170 416 500 990 1. GFRP 170 416 500 990 1	27,0 416 500 990 1 170 416 500 990 1	416 500 990 1	200 890 0,02 200 890 1	290 0,/2 1 090	5 -		1.14		2 4 4	2 1 1	545 4 5	R 9	210.96	5.25	4.17	3.93	4.13	8/'0	11,1	1,14 1,11	1,94
1.13 [48] GFRP 300 1088 1200 3000 1,15	GFRP 300 1088 1200 3000 1,15	300 1088 1200 3000 1,15	1088 1200 3000 1,15	1200 3000 1,15	3000 1,15	1,15		1,21	37 28	8,6 66	6,4 1	000 2(587	974,97	8.55	7,39	6,5	5,87	1,69	2,7	1,62	2,8
20.83 [48] GFRP 300 1088 1200 2300 0,83	GFRP 300 1088 1200 2300 0,83	300 1088 1200 2300 0,83	1088 1200 2300 0,83	1200 2300 0,83	2300 0,83	0,83		1,21 3,	8,7 25	9,2 66	6,4 1	3(000	1301,84	9.40	8,12	7,1	6,41	1,33	2,41	1,36	2,30
71.47 [48] GFRP 300 1088 1200 3700 1,47	GFRP 300 1088 1200 3700 1,47	300 1088 1200 3700 1,47	1088 1200 3700 1,47	1200 3700 1,47	3700 1,47	1,47		1,21 3.	8,7 5.	9,2 60	6,4 1	000 11	849	730,17	5.80	5,01	4,38	3,95	1,42	2,64	1,30	2,53
(3D9M-1.4 [45] AFRP 200 250 290 1500 1,4	AFRP 200 250 290 1500 1,4	200 250 290 1500 1,4	250 290 1500 1,4	290 1500 1,4	1500 1,4	1,4		0,38 2	6,1 2	34 80	0,6 1	827 27	2,1	78'66	6.07	5,24	4,28	4,19	1,04	1,74	1,15	2,72
43D9M-1.7 [45] AFRP 200 250 290 1500 1,7	AFRP 200 250 290 1500 1,7	200 250 290 1500 1,7	250 290 1500 1,7	290 1500 1,7	1500 1,7	1,7		0,38 2	6,1	34 81	0,6 1	827 19	6/1	76,16	4.41	3,81	3,12	3,05	66,0	1,7	86'0	2,60
43D9M-2.1 [45] AFRP 200 250 290 1500 2,1	AFRP 200 250 290 1500 2,1	200 250 290 1500 2,1	250 290 1500 2,1	290 1500 2,1	1500 2,1	2,1		0,38	6,1	8	0,6	827 1	26	53,06	4.90	3,39	2,77	2,71	1,05	2,07	1,05	3,32
44D9M-1/ [45] AFRP 200 250 290 1500 1,7	AFRP 200 250 290 1500 1,7	200 250 290 1500 1,7	250 290 1500 1,7	290 1500 1,7	1500 1,7	1.7		0,51 2	6,1 2	50	0,6	827 2	42	88,23	4.90	4,22	3,67	3,72	1,09	٥ <u>1</u>	1,18	2,74
4507M-L/ (=) AFRP 200 250 290 1500 1,7	AFRP 200 250 290 1500 1,7	200 250 290 1500 1,7	7,1 0021 022 022	7,1 0021 002	1/1 0051	17		0,64	19	100 E	9,6	827 26	5/1	98,84	5.04	4,33	3,92	4,12	1,16	197	1,29	1/2
	VT DOT DOT DT DT DT DT		/T ODET DEE DIE	/T DOLT DEE	1100 T'T			1000	1.0	5 :		170		00/00	70.4	ה ה ה	44/n		9011	E (1	071	2022
	CEDD 200 250 250 1500 17	500 350 360 1500 15	250 250 1500 174	200 1500 1.7	1500 1.7	4 1		2 050	10			000	(e	70.00	10.0	100	275	17.4	777	n (101	07/5
3D9M-2.1 [45] CFRP 200 250 290 1500 2.1	CFRP 200 250 290 1500 2.1	200 250 290 1500 2.1	250 290 1500 2.1	290 1500 2.1	1500 2.1	21		0.38	6.1	1	1	956 10	53	54.90	2.06	177	136	133	0.59	11	0.61	1.92
#D9M-1.7 [45] CFRP 200 250 290 1500 1.7	CFRP 200 250 290 1500 1,7	200 250 290 1500 1,7	250 290 1500 1,7	290 1500 1,7	1500 1,7	1.7		0,51 20	6,1 2	12 12	0.2 1	956 19	12.2	91,29	3.41	2,94	2,39	2,43	0,81	1,34	26,0	2,11
SD9M-1.7 [45] CFRP 200 250 290 1500 1.7 (CFRP 200 250 290 1500 1,7 0	200 250 290 1500 1,7 (250 290 1500 1,7 0	290 1500 1,7 0	1500 1,7 0	1,7		0,64 21	6,1 2	12	0,2 1	956 30	12,8	102,26	4.99	4,29	3,63	3,82	1,23	1,98	1,43	2,96
15D9L-1.7 [45] CFRP 200 310 350 1500 1,7 (CFRP 200 310 350 1500 1,7 (200 310 350 1500 1,7 (310 350 1500 1,7 (350 1500 1,7 (1500 1,7 (1,7 (-	0,51 2,	6,1 2	12	1 10,2	956 25	8,08	110,18	4.38	3,78	3,05	2,96	1,09	1,66	1,32	2,64
V3D9S-L7[45] AFRP 200 190 230 1500 1,7	AFRP 200 190 230 1500 1,7	200 190 230 1500 1,7	190 230 1500 1,7	230 1500 1,7	1500 1,7	1,7		0,5 2	6,1 2	14 80	0,6 1	827 21	19,2	69,29	5.48	4,73	4,2	4,44	1,12	2,28	1,47	3,16
CFRP 200 190 230 1500 1,7	CFRP 200 190 230 1500 1,7	200 190 230 1500 1,7	190 230 1500 1,7	230 1500 1,7	1500 1,7	1,7		0,5 2	6,1 2	14 12	0,2 1	956 20	19,7	71,69	4.59	3,96	3,29	3,48	1,02	1,94	1,05	2,93
78N6 [42] GFRP 300 1097 1200 3000 1,14 (GFRP 300 1097 1200 3000 1,14 (300 1097 1200 3000 1,14 (1097 1200 3000 1,14 (1200 3000 1,14 (3000 1,14 (1,14 (-	0,69 4.	9,3 1	13 41	7,6 7	790 1/	447	660,33	5.71	4,84	4,05	3,21	0,74	1,69	1,09	2,19
78N8 [42] GFRP 300 1088 1200 3000 1,15 1	GFRP 300 1088 1200 3000 1,15 1	300 1088 1200 3000 1,15	1088 1200 3000 1,15 1	1200 3000 1,15 1	3000 1,15 1	1,15	100	1,24 4,	63	3	ر ر	750 15	906	854,75	6.04	5,13	4,49	4,08	86'0	1,86	1,22	2,23
212N3 [42] CFRP 300 1111 1200 3000 1,13 0	CFRP 300 1111 1200 3000 1,13 0	300 1111 1200 3000 1,13 0	1111 1200 3000 1,13 0	1200 3000 1,13 0	3000 1,13 0	1,13	0.0	26 3	8,7 2	9.2	20	596 1:	191	581,36	5.04	4,35	2,65	1,85	0,77	1,51	1,02	2,05
412/4+[44] CHAP 300 1106 1200 300 1,13 0	CFKP 300 1106 1200 300 1,13 0	0 FT/I 000F 007I 90II 00F	0 FT/I 000F 007I 90II		1,115 U 1,125 U	0 FUT			2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	76		000 01	100	00,848	67.5	14,4	20/F	6717	1,14	1,03	51/1	1,50
1 /01 ZCD1 00E /CZ 01E 94KP 1/01 ZCD 1/01 2/01 1/01 2/01 2/01 2/01 2/01 2/01	GFRP 310 25/ 340 1052 1,0/ 1 GED0 310 361 310 1353 1.44 1	1 /U,1 2CU1 0UE /C2 UIE 1 /U,1 2CU1 0UE 12C 0UE	1 /U(1 2001 006 /02	1 ///1 ZCUI 008	1 /0/1 2001	1 1/0/1		4 CV	707	23 20 24		8 600	14	P//CC7	287/	18/0	18,0	68'8	1	2	21,1	3,18
THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TOT OFF THE TO	CUC 251 010 107 010 010 010		CUC 2521 012 192	210 1553 202	1553 2.02	100		1 47 4	4 C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	1 0			1	109.08	121		2.01	258	050	117	250	2.72
V4H [44] GFRP 310 261 310 1553 2,02 1	GFRP 310 261 310 1553 2,02 1	310 261 310 1553 2,02 1	261 310 1553 2,02	310 1553 2,02	1553 2,02	2,02		147 6	4,6 21	25 41	11	1 607	52	109,08	1.76	1,36	1,27	1,63	0,28	8,0	0,34	1,76
31N [44] GFRP 300 503 608 1590 1,08	GFRP 300 503 608 1590 1,08	300 503 608 1590 1,08	503 608 1590 1,08	608 1590 1,08	1590 1,08	1,08		1,7 4,	0,5 21	1E 6'6	7, P, T	765 11	273	545,56	7.54	6,52	6,88	7,61	8,0	1,62	0,92	2,33
32N [44] GFRP 300 501 606 1986 1,48	GFRP 300 501 606 1986 1,48	300 501 606 1986 1,48	501 606 1986 1,48	606 1986 1,48	1986 1,48	1,48		1,71 3.	9,9 2,	9,7 3,	7,97	765 7	66	379,95	4.76	4,12	4,35	4,83	0,68	1,64	0,75	2,10
33N [44] GFRP 300 502 607 2580 2,07	GFRP 300 502 607 2580 2,07	300 502 607 2580 2,07	502 607 2580 2,07	607 2580 2,07	2580 2,07	2,07		1,71 4	1,2 3(0,2 3,	6/	765 4	31	223,32	2.54	2,19	2,31	2,56	0,52	1,44	0,52	1,93
34N [44] GFRP 300 496 606 1971 1,48	GFRP 300 496 606 1971 1,48	300 496 606 1971 1,48	496 606 1971 1,48	606 1971 1,48	1971 1,48	1,48		2,13 4	0,7 2	9,9	1,1	8 60/	30	408,24	4.48	3,87	3,97	4,82	69′0	1,55	0,75	2,03
35H [44] GFRP 300 497 607 1971 1,48 Vet MAT Creat 300 605 640 3580 305	GFRP 300 497 607 1971 1,48 Croo 300 505 540 350 305	300 497 607 1971 1,48 200 505 540 3560 305	497 607 1971 1,48 505 540 3550 305	607 1971 1,48 640 3660 3.06	1971 1,48	1,48		2,12 6	6.4 0.4	5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	11	109	290	407,95	5.48	4,21	3,98	4,82	0,54	1,68	0,76	2,60
11 [44] GFRP 301 889 1003 2448 11	GFRP 301 889 1003 2448 11	301 889 1003 2448 11	889 1003 2448 11	1003 2448 11	2448 1.1	11		158 5	16 3	18 41		2 2	590	945.87	8.24	6.88	653	6.42	0.68	2.14	0.87	2.40
2N [44] GFRP 304 891 1005 3157 1,49	GFRP 304 891 1005 3157 1,49	304 891 1005 3157 1,49	891 1005 3157 1,49	1005 3157 1,49	3157 1,49	1,49		1,56 5	0,7 3.	3,5 42	2,3	338 13	324	666,88	4.77	4,01	3,82	3,73	0,53	1,97	0,64	1,99
-0.7/1.6 [41] CFRP 250 326 400 1600 1,69	CFRP 250 326 400 1600 1,69	250 326 400 1600 1,69	326 400 1600 1,69	400 1600 1,69	1600 1,69	1,69		0,78 4	0,5 21	9,9 1,	43 1	036 3	59	141,15	2.94	2,54	1,98	2,05	0,59	1,17	0,79	2,54
4-0.//L.b.[41] GFRP 250 326 400 1600 1,69	GFRP 250 326 400 1600 1,69	250 326 400 1600 1,69	326 400 1600 1,69	400 1600 1,69	1600 1,69	1,69		0,78 4	202	5 C	- ·	176	52 52	122,16	4.03	3,48	3,31	3,42	0,63	121	0,81	2,69
-1-12/16/11 CC00 350 376 A00 1600 1,03	CEDD 250 325 400 1000 1,09	250 326 400 1600 160	326 400 1600 160	400 1600 1.69	1600 1.60	1 60		1 24 V		7 0	 	2 050 050	5 5	15/11	267	217	721	264	0.58	1'1	08'0	51'7
	CCD 1 0001 000 020 020 000 1000		270 1000 1000 1000 1000	400 1000 100	1000 1 0001	1 60		1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2					8 0	00 000	200	22.6	100	200	55.0	1911	100	4
142/172/1720 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000	CCDD 350 375 400 1500 150	250 250 400 1001 000 250 052	575 400 1200 120	400 1000 100	1000 1 20	1 60		1 21			 -	4 000 ac	2 6	10/ 00	02.0	210	217	2,00	110	AT'T	150	51,2
212/1.3 [41] CFRP 250 326 400 1600 1.3 1	CFRP 250 326 400 1600 13 1	250 326 400 1600 13 1	326 400 1600 1.3 1	400 1600 1.3 1	1600 13	13		24 4	05 20	11	43	036 7	44	253.16	5.23	4.52	3.66	4.24	76.0	142	1.23	2.94
11.2/1.3 [41] GF8P 250 326 400 1600 13	CE 021 100 100 13	250 326 400 1600 13	326 400 1600 13	400 1600 13	1600 13	1		124 4	10	00		2 924		21910	5 64	4.88	4.83	05.5	0.7	1 46	101	246
PLR-11391 CEDD 150 150 200 155	CEDD 150 200 450 155	150 150 000 050 155	150 200 950 155	200 950 155	950 155	i i		111	1 24	1		180 15	12	58.18	477	3.75	100	4 27	00	1 22	1 45	3.18
PL-4-250 [39] CEAP 150 250 300 950 1.41	CEBP 150 250 300 950 1.41	150 250 300 950 1.41	250 300 950 141	300 950 1.41	950 1.41	1 41		1 35	1 2	14	1 1	180 20	1 8	108.25	515	360	2 98	3.76	112	1 20	133	27.6
PL-4.350 [39] CDD 150 350 400 950 136	CC00 150 350 400 950 136	150 250 400 050 136	350 400 950 136	400 050 136	950 136	1 26		101	76 35			180 46		142.96	673	4.75	2 04	4 44	10	10	113	3 78
-B-1 [39] GFRP 150 150 200 950 155	GFRP 150 150 200 950 155	150 150 200 950 1.55	150 200 950 155	200 950 1.55	950 1.55	155		129 3	55	8	1 80	11 000	1 2 2	47.53	3.72	3.84	4.19	56	0.65	1.73	116	2.85
-d-250 [39] GFRP 150 250 300 950 1.4	GFRP 150 250 300 950 1.4	150 250 300 950 1.4	250 300 950 1.4	300 950 1.4	950 1.4	1	-	1.39	12 31	0.5 40	0.8	555 24	1.5	81,84	5.50	4,34	4,36	5,53	16,0	1,5	1,39	2,97
-d-350 [39] GFRP 150 350 400 950 1,30	GFRP 150 350 400 950 1,30	150 350 400 950 1,30	350 400 950 1,30	400 950 1,3(950 1,3(1,3	12	1,24 4	18	2,6 41	0,8	555 42	12,5	107,82	4.63	5,82	5,66	6,42	1,34	1,86	1,93	3,92
															5.13	4,34	3,91	4,21	68'0	1,6	1,05	2,48
															1.88	1,57	1,54	1,76	0,32	0,41	15,0	0,48
															36.6	36,2	39,4	41,7	36,3	25,6	29,5	19,57

	MSN/*	0,56	0,58	0,64	0.71	0,75	1,67	1,16	1,03	0,92	1,15	1,75	1,41 n se	0.98	1,0	0,80	0,59	0,79	1,1	1,14 1 30	0.05	0.92	0,99	0,78	0,92	1,67	1,39	6, 5	1,29	15'0	0,85	0,94	1,57	0,98	1,50	1.09	1,23	0,93	0,89	0,76	1,23	1.01	1,0	1,31	1,29	1,05	1,27	1,04	1 JR	0,20
	ass [10] A																																																	
	& S. Ramad	0,91	0,81	8,0 18,0	68'n	0,89	1,67	1,13	1,64	0,80	1,00	1,56	1,4/	1.34	1,01	0,80	0,61	0,94	1,51	1'/0	080	0.73	0,87	0,61	0,79	1,12	0,69	0,49	12 12 10 10	n/'n	0,53	0,74	0,78	0,38	0,84	0.95	0,81	96'0	0,76	0,85	1,28	0.86	1,59	2,08	2,14	1,34	2,04	1,65 1,65	0 47	40 BU
	Job Thomas																																																	
	n et al. [39]	1,24	1,65	1,68	1.67	1,76	1,79	1,82	2,17	0,67	1,02	1,46	61'I	1.11	0,65	0,74	1,13	1,01	66'0	1,34	11/0	1.09	1,25	66'0	1,30	1,11	1,00	5	67 T	1 75	0 14 1	1,27	1,26	2,03	1,49 1 AE	1.28	1,12	1,32	1,04	1,05	1,108 1,08	0.88	0,96	2,14	2,78	1,06	1,75	1,45 + 78	1,40	20 80
	s [38] Adan																																																	
	choff & Gros	1,88	2,36	2,59	54,1 24,1	2,75	3,00	3,04	3,54	1,05	1,57	8, 1 7	8 F	1,76	1,09	1,20	1,67	1,62	9 <u>,</u>	777	1 =	181	2,11	1,70	2,20	1,85	1,64	1,57	2,01	6 1 1	1,92	2,00	2,05	2,37	2,41	1 27	1,71	2,26	1,59	1,79	1,84	1.38	1,60	3,62	4,71	1,64	2,88	2,45 7 04	5 ⁷	Ve ee
	djai (37) Bis						-									-										~							_	~	_															
Δ _{u,P}	Rafi & Na	1,9,	2,4	2,6	7.4	2,6	2,9	2,9	5°	1,0	1 1 1	2,2	9 F	1.1	6'0	1,0	1,52	1,4	4, 1 7	5 ÷	1 0	17.1	2,0	1,31	1,8	1,9	1,6	1 1 1	19 1	0'T	2 7 1	2,0	2,11	2,6	2,5	1.8	1,79	1,8	1,6	1,45	1 1 1	1.4	1,3	3,1	4,0	1,7	2,9	2,5	10.6	5.0
Δ _{u,e} /	ost et al. [36]	1,80	2,26	2,45	7,35	2,6	2,94	2,95	3,48	1,05	1,57	2,29	1,89 1,84	1.75	1,08	1,19	1,66	1,59	1,63	4 10	a, -	171	7	1,63	2,1	1,81	1,58	ŋ !	1,75	1 85	1,88	1,94	1,98	2,29	2,35	1 21	1,69	2,17	1,55	1,74	c/1 18	1.36	1,58	3,56	4,62	1,62	2,81	2,39 1 08	166	2 22
	ane [35] Y	4	90	ω,		6	5	4	52	9	6	6	0			9	89	m				4 09	10	80			-					0	10	50	4 8	مر	7	5	9	4		- 14	=	9	2				2 8	
] Benmokr	1,4	1,7	5,1	n -	07	2,4	2,4	2,8	9 ^{,0}	1,2	1	3.	1 4	ď	5'0	1,2	4	1			3 1	1,6	1,2	1,7	1,5	Ţ.	;	ņ:	- -	1 4	1,5	1,6	1,6	5, F	1	, 1 ,	1,7	1,2	1,4	1 1	1	1,5	2,9	3,5	1,3	ς, 2	1,9	4 0)
	40.1R-15 [41	1,82	2,26	2,57	1,84 7 3	2,65	3,03	3,07	3,59	1,05	1,57	7,31	5 E	177	1,09	1,2	1,65	1,62	1,65	2/2 1 10	11	121	2,13	1,67	2,22	1,85	1,64	1,56	1,8	1 01	191	2,01	2,06	2,09	2,43	1 22	1,7	2,27	1,59	1,79	1,84 1,84	138	1,6	3,65	4,77	1,63	2,91	2,51 2,03	5,42	en/n
	[32] ACI 44																																																	
	CAN/CSA-12	1,67	2,03	2,29	1,03	2,32	2,93	2,92	3,42	1,02	1,5	2,21	() () ()	1.7	1,06	1,16	1,51	1,55	1,62	115	1 08	1.59	1,97	1,48	2,04	1,8	1,56	14	9 9	1 70	, E,	1,89	1,94	1,85	2,31	2.09	1,57	2,15	1,47	1,73	18	132	1,56	3,54	4,62	1,55	2,76	2,37	e't	74.7
	ils-07 [28] (1,75	2,14	2,37	1,/0 7 16	2,41	2,95	2,96	3,46	1,Q	1,53	2,25	1 ^{,8} /	173	1,07	1,18	1,56	1,58	1 1 1 1	2,18 1 1 7	1	1.64	2,01	1,53	2,09	1,82	1,59	1,48	1,71	1 1 1	1,78	1,93	1,97	1,95	2,35	214	1,61	2,19	1,51	1,75	1,15	134	1,58	3,57	4,65	1,59	2,8	2,39 1 OS	0.66	23.0
	R-06 [40] 19	2	3				8	8	8	1	8	8	2 5	3 6	8	9	8	5	3	3 5		1 6	8	11	8	2	8		e 9	R S		8	Ħ	5	8 K		11	9	8	4			8	5	23	8	8	g 5	2 -	
) ACI 440.1	1,8	2,3	2	- F	2	2,5	2,9	Е	1,0	÷,	7		1	1	1	1,6	Ť	÷î î	4.	1.	1.1	5,0	11	2,0	1,5	τ,				4 A	1,9	2,0	2,5	~ ~	1 4	1,1	2,1	1,6	τ,	à à		, t	3,5	4,6	1,6	2,8	61 C	10	r 8
	M (equa. 40	5,5	5,58	2'69 2'5	5 83 5	5,75	13,21	9,20	28,33	19,70	19,70	07,91	18,99	17.00	16,96	16,96	16,96	16,34	15,89	14,05 71 77	18.74	13,44	12,07	12,52	10,87	7,43	8,10	12,15	7,36	12 27	18,10	12,24	9,03	13,13	10,60	9.12	14,32	8,61	13,51	8,27	17,95 8.61	13.51	8,80	6,12	5,59	13,32	9,48	7,48		
	(mm) NS	3,1	3,21	3,62	4 11	4,32	22	10,7	29,1	18,2	22,74	34,5	20'92	16.7	16,98	13,62	10,04	12,98	18,02	10,00 78 78	07'07	12.4	11	9,8	8	12,4	11,3	6,01 5,01	5,6	121	191	11,5	14,2	12,9	15,9 18 2	6.6	17,6	60	11	6,3	10.6	13.7	8,8	60	7,2	14	11	7,8		
	(Mpa) A	655	680	89	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	5	1000	1000	1000	1827	1827	1827	182/	1827	1956	1956	1956	1956	1956	1877	1055	790	750	1596	1899	709	209	60	50 I	6 ¥	<u>8</u> 2	709	602	765	938 938	1036	776	1036	776	1036	0// 1036	776	1180	1180	1180	690	655	655		
	Er(Gpa)	41	4	ន្ត ៖	47 41 R	4	66,4	66,4	66,4	80,6	80,6	9,6	9/08	80.6	120,2	120,2	120,2	120,2	120,2	1/0/1 80.6	120.7	47.6	51,9	120	144	41,1	41,1	41,1	41,1	۲ ^{//} C	5/15 37,9	41,1	41,1	37,9	47'3 8 '4	1 2	43	143	43	143	2 4 EA1	4	134	134	134	40,8	40,8	40,8		
	Ec (Gpa)	35,9	36,1	35,8	0,05 8,75	36,4	28,6	29,2	59,2	2	¥ :	R :	4 F	4 2	2	54	54	54	s :	\$ F	5 2	5 g	R	2,92	29,2	23	22,9	24,2	272	2,52 7 05	30,2	29,9	38,3	38,9	33,8 2 5	56.9Z	29,9	29,9	29,9	29,9	6'67 50'0	29.9	27,72	30,4	28,8	28	30,5	32,6		
	f _c (MPa)	58,5	65	8	c, 8	8	37	38,7	38,7	26,1	26,1	26,1	1'97 7	26.1	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1 5	76,1 7,61	7K 1	767	49,3	38,7	38,7	40,2	45,4	41,3	64 6	0,0% 0 0 0 0	41,2	40,7	66,4	68,5	51,6 50,7	40.5	40,5	40,5	40,5	40,5	c, 8	40.5	34,7	41,7	37,6	35,5	42	8		
	Pr (%)	1,7	1,7	1,7	1 14	1,14	1,21	1,21	1,21	0,38	0,38	85, 5	150	50	0,38	0,38	0,38	0,51	5, S	15'0	3 8	690	1,24	0,26	0,46	1,49	1,47	1,47	1,47	1 F.	1 5	2,13	2,12	1,7	1,58 7,58	0.78	0,78	1,24	1,24	1,71	1,24	1.24	1,13	1,35	1,21	1,29	1,39	1,24		
	(b/e) (0,5	0,75	- ;	ς, ξ	-1	1,15	0,83	1,47	1,4	1,1	2'1 '	2:	7 1	1,4	1,7	2,1	1,7	1,1	<u>, 1</u>	÷ •	1.14	1,15	1,13	1,13	1,07	1,44	2,02	2'03 • • •	4 VB	2,07	1,48	1,48	2,06	1, 1	1.69	1,69	1,69	1,69	1,69	8 T	1	1,55	1,41	1,36	1,55	1,41	1,36		
) L (mm)	66	66	<u>6</u>	6 9	66	3000	2300	3700	1500	1500	51 1	0 1 1	9 9 9 5 E	1500	1500	1500	1500	8 <u>5</u>		8 £	8	3000	3000	3000	1052	1252	5	1553	108CL	2580	1971	1791	2580	2448	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	950	950	950	950	920	920		
	n) D (mm	20	<u>8</u>	8	2 S	8	3 1200	3 1200	3 1200	230	ស្ត្	62	067	8 8	290	290	230	290	62			1200	3 1200	1 1200	5 1200	306	310	98 H	310		60	606	603	610	1001	8	400	400	64	8	8 9	<u>8</u>	200	300	64	20	8	ŝ		
	m) d (mr	416	416	416	416	416	108	108	108	250	55	52	05		250	250	250	250	520		e e	2601	108	1111	1106	257	261	261	261	5	20 27	496	497	505	68 10	326	326	326	326	326	326	326	150	250	350	150	250	35		
	ebar b(m	170	170	170	12	170	300	300	300	<u>5</u>	50	500		200	20	200	200	50	200	002	000	300	300	300	300	310	310	310	310	002	30 8	300	300	30	301	250	250	250	250	250	720 720	250	150	150	150	150	120	150		
	ype of FRP re	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	AFRP	AFRP	AFRP	AFRP	AFRP	CFRP	CFRP	CFRP	CFRP	CFRP	AFED	CEDD	GFRP	GFRP	CFRP	CFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GEDD	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	GFRP	CFRP	GFRP	CFRP	GFRP	CFRP	GFRP CFRP	GFRP	CFRP	CFRP	CFRP	GFRP	GFRP	GFRP		
	-	t,	4	a :	4 1	-	8	60	60	1.4 [45]	1.7 [45]	2.1 [45]	1.7 [45]	7 [45]	L.4 [45]	L.7 [45]	2.1 [45]	1.7 [45]	1.7 [45]	[c#]/.	7 [A6]	E -	-	[2]	[2]											5[41]	5 [41]	5 [41]	6 [41]	6 [41]	6 [41] 3 [41]	3 [41]	6	(39)	[39]		66	[39]		
	o. Beam ID	G6/0.5 [4	G6/0.75	G6/1.0	G4/0.75	G4/1.0 4	G1.13 [4	G0.83 [4	G1.47 [4	-M9D5M-	A3D9M-	A3D9M-	ASDAM	ASD91-1	C3D9M-1	C3D9M-3	CID9M-	C4D9M-	CSD9M-	ARDOC:1	Canoc.	GBN6 [42	G8N8 [42	C12N3 [4	C12N4 [4	A1N [44]	A2N [44]	A3N [44]	A4H [44]	TTO NTO	B3N [44]	B4N [44]	B5H [44]	B6H [44]	CIN [44]	C-0.7/1.6	G-0.7/1.	C-1.2/1.0	G-1.2/1.	C-1.7/1.	G-1 2/13	G-1.2/1	CF-B-1 [3	CF-d-250	CF-d-350	F-B-1 [39	F-d-250	F-d-350		
	SI.N		2				-	60	•	9	= :	1	a :	4 5	19	5	1 8	9	2	4 8	1 1	1 2	ង	56	52	58	ន	8	# 1	2 8	3	52	36	21	<u>ه</u>	8	41	4	4	4	a a	4	8	6	s	5	23	53		1 2

References

- [1] Abed F, Elchabib H, Alhamaydeh M. Shear characteristics of GFRP-reinforced concrete deep beams without web reinforcement. Journal of Reinforced Plastics and Composites 2012;31(13):1063–1073.
- [2] Dhahir MK. Strut and tie modeling of deep beams shear strengthened with FRP laminates. Composite Structures 2018; 193:247–259.
- [3] Farghaly AS, Benmokrane B. Shear behavior of FRP-reinforced concrete deep beams without web reinforcement. Journal of Composites for Construction 2013;17(4):04013015–040130210.
- [4] Baghi H, Barros JA, Kaszubska M, Kotynia R. Shear behavior of concrete beams reinforced exclusively with longitudinal glass fiber reinforced polymer bars: Analytical model. Structural Concrete 2018;19(1):162–173.
- [5] Ayman M. Composites: Construction materials for the new era. In: Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction (ACIC), Venice, Italy; 2004. p. 45–58.
- [6] International Federation for Structural Concrete (fib). Bulletin 40: FRP reinforcement for RC structures. 2007.
- [7] Yavuz G. Lif takviyeli polimerlerin betonarme kirişlerde donatı olarak kullanımı. e-Journal of New World Sciences Academy 2011;6(4):1A0212:1001–1015.
- [8] Numerical analysis of AFRP reinforced concrete columns with replaceable structural fuses as energy dissipaters under cyclic loading. In: Proceedings of the Structures Congress 2018, Fort Worth, TX, USA. doi:10.1061/9780784481332.029.
- [9] Lu WY, Hwang SJ, Lin IJ. Deflection prediction for reinforced concrete deep beams. Computers and Concrete 2010;7(1):1–16.
- [10] Thomas J, Ramadass S. Prediction of the load and deflection response of concrete deep beams reinforced with FRP bars. Mechanics of Advanced Materials and Structures 2019. doi:10.1080/15376494.2018.1549292.
- [11] Nehdi M, Omeman Z, El-Chabib H. Optimal efficiency factor in strut-and-tie model for FRP-reinforced concrete short beams with (1.5 < a/d < 2.5). Materials and Structures 2008; 41:1713–1727.
- [12] El-Sayed AK, El-Salakawy EF, Benmokrane B. Shear strength of fibre-reinforced polymer reinforced concrete deep beams without web reinforcement. Canadian Journal of Civil Engineering 2012;39(5):546–555.
- [13] Farghaly AS, Benmokrane B. Shear behavior of FRP-reinforced concrete deep beams without web reinforcement. Journal of Composites for Construction 2013;5(4):268–275.
- [14] Andermatt MF, Lubell AS. Behavior of concrete deep beams reinforced with internal fiber-reinforced polymer Experimental study. ACI Structural Journal 2013;110(4):585–594.
- [15] Kim D, Lee J, Lee YH. Effectiveness factor of strut-and-tie models for concrete deep beams reinforced with FRP rebars. Composites Part B: Engineering 2014;56:117–125.
- [16] Mohamed K. Performance and strut efficiency factor of concrete deep beams reinforced with GFRP bars. Ph.D. thesis. Sherbrooke: University of Sherbrooke; 2015.
- [17] IS 1343. Code of Practice for Prestressed Concrete (1st Revision). New Delhi: Bureau of Indian Standards; 1980.
- [18] Dischinger F. Contribution to the theory of the half disc and the wall-like wearer. International Association of Bridge and Structural Engineering 1932;1:69–93.
- [19] IS 456. Plain and Reinforced Concrete, Code of Practice (4th Revision). New Delhi: Bureau of Indian Standards; 2000.
- [20] Hwang SJ, Lee HJ. Strength prediction for discontinuity regions by softened strut-and-tie model. Journal of Structural Engineering 2002;128(12):1519–1526.
- [21] Hsu TTC. Toward a unified nomenclature for reinforced concrete theory. Journal of Structural Engineering 1996;122(3):275–283. [Also see discussion by Mo YL, Hsu TTC. Journal of Structural Engineering 1997;123(12):1691–1693.]
- [22] Hwang SJ, Lee HJ. Analytical model for predicting shear strengths of exterior reinforced concrete beam-column joint for seismic resistances. ACI Structural Journal 1999;96(5):846–857.

- [23] Hwang SJ, Lu WY, Lee HJ. Shear strength prediction for deep beams. ACI Structural Journal 2000;97(3):367–376.
- [24] Hwang SJ, Lu WY, Lee HJ. Shear strength prediction for reinforced concrete corbels. ACI Structural Journal 2000;97(4):543–552.
- [25] Hwang SJ, Fang WH, Lee HJ, Yu HW. Analytical model for predicting shear strengths of squat walls. Journal of Structural Engineering 2001;127(1):43–50.
- [26] Zhang LXB, Hsu TTC. Behavior and analysis of 100 MPa concrete membrane elements. Journal of Structural Engineering 1998;124(1):24–34.
- [27] British Standards Institution. British Standard Code of Practice for the Structural Use of Concrete. P:110, Part-I, 14–16. London: BSI; 1972.
- [28] Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS). Reinforcing concrete structures with fibre reinforced polymers. ISIS-M03-07; 2007.
- [29] Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Recommendations for design and construction of concrete structures using continuous fibre reinforced materials. Concrete Engineering Series, No. 23. Tokyo: JSCE; 1997.
- [30] British Institution of Structural Engineers (BISE). Interim guidance on the design of reinforced concrete structures using fibre composite reinforcement. London: BISE; 1999.
- [31] National Research Council (NRC). Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars. CNR-DT-203-NRC-06. Ottawa: NRC; 2006.
- [32] Canadian Standards Association. Design and Construction of Building Structures with Fibre-reinforced Polymers (CAN/CSA S806-11). Ontario: CSA; 2011.
- [33] American Concrete Institute (ACI). Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318-08). Farmington Hills, MI: ACI; 2008.
- [34] Kumar P. Short-term deflection of deep beams. ACI Journal 1978;75(8):381-383.
- [35] Benmokrane B, Challal O, Masmoudi R. Flexural response of concrete beams reinforced with FRP reinforcing bar. ACI Structural Journal 1996;93(1):46–55.
- [36] Yost JR, Gross SP, Dinehart DW. Effective moment of inertia for glass fiber-reinforced polymerreinforced concrete beams. ACI Structural Journal 2003;100(6):732–739.
- [37] Rafi MM, Nadjai A. Evaluation of ACI 440 deflection model for fiber-reinforced polymer reinforced concrete beams and suggested modification. ACI Structural Journal 2009;106(6):762–771.
- [38] Bischoff PH, Gross SP. Equivalent moment of inertia based on integration of curvature. Journal of Composites for Construction 2011;15(3):263–273.
- [39] Adam MA, Said M, Mahmoud AA, Shanour AS. Analytical and experimental flexural behaviour of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymer bars. Construction and Building Materials 2015; 84:354–366.
- [40] ACI Committee 440. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06). Farmington Hills, MI: ACI; 2006.
- [41] ACI Committee 440. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI 440.1R-15). Farmington Hills, MI: ACI; 2015.



Research Article / Araştırma Makalesi

Adıyaman University Journal of Engineering Sciences Adyü J Eng Sci 2025;12(25):20-32 Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Adyü Müh Bil Derg 2025;12(25):20-32

https://doi.org/10.54365/adyumbd.1574521

Thermal Control System Developed to Maximize the Use of Renewable Energy Space Heating Systems

Mahal Isıtma Sistemlerinde Yenilenebilir Enerjiden Maksimum Fayda Sağlamak İçin Geliştirilen Termal Kontrol Sistemi

Mehmet Latif Levent^{1*}

¹Hakkari University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Hakkari/Türkiye

Öz Abstract Binalarda ve kapalı ortamlarda enerjinin çoğunluğu In buildings and enclosed spaces, the majority of energy consumption is attributed to space heating mahal ısıtma sistemleri tarafından sağlanmaktadır. systems. The integration of renewable energy sources Hem enerji maliyetleri hem de çevresel etkilerin into these systems plays a crucial role in reducing both azalmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme energy costs and environmental impacts. In this study, entegrasyonu önem arz etmektedir. Bu çalışmada; a hybrid system was designed to enable the efficient mahal ısıtma sistemlerinde, güneş enerjisinin etkin bir utilization of solar energy in space heating systems. şekilde kullanımını sağlayan hibrit bir sistem Data obtained from the system were processed using tasarlanmıştır. Sistemden alınan veriler Arduino an Arduino board to develop a control mechanism. The kartında değerlendirilip kontrol mekanizması system can be remotely controlled by users via the tasarlanmıştır. Arduino IoT Cloud platformu üzerinde; Arduino IoT Cloud platform. To demonstrate the kullanıcı sistemi uzaktan kontrol edebilmektedir. effectiveness of the designed system, an experimental Tasarlanan sistemin etkinliğini göstermek amacıyla bir setup was established. The application results were deney düzeneği hazırlanmıştır. Uygulama sonuçları; obtained in Hakkari Province over several days and at Hakkari İlinde farklı günlerde ve üç kademede three different operational levels. Transitions between gerçekleştirilmiştir. Kademeler arasındaki geçişler levels occurred either automatically, based on ambient ortam sıcaklığına bağlı olarak otomatik olarak ya da temperature, or manually by the user. At Stage 3, the kullanıcı tarafından gerçekleşmektedir. Kademe 3'de highest temperature achieved was approximately en yüksek sıcaklık yaklaşık 43°C olarak ölçülmüş ve bu 43°C, indicating that maximum benefit from solar kademede güneş enerjisinden maksimum fayda energy was obtained. This system has the potential to sağlandığı sonucuna varılmıştır. Tasarlanan bu sistem; özellikleg gelecekte bina enerji yönetiminde yön significantly contribute to future energy management in buildings and provide sustainable solutions to verebilecek ve sürdürülebilir enerji problemlerinde energy challenges. çözüm olabilecek potansiyele sahiptir. olduğu ve daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir

Keywords: Hybrid System, Arduino, Solar collector,	Anahtar Kelimeler: Hibrit Sistem, Arduino, Güneş
Remote Access, Renewable Energy	Kollektörü, Uzaktan Erişim, Yenilenebilir Enerji

^t Corresponding e-mail (Sorumlu yazar e-posta): <u>mehmetlatiflevent@hakkari.edu.tr</u> **Received (Geliş Tarihi):** 28.10.2024, **Accepted (Kabul Tarihi):** 20.01.2025

1. Introduction

Energy has become the most fundamental problem and indispensable need due to the requirements of the age we live in. In the production phase of energy, the increase in fossil fuel consumption has brought about the problem of environmental pollution [1-2]. Greenhouse gases released into the atmosphere along with the increasing consumption of fossil fuels in the energy production phase have also triggered global warming [3-4]. Today; As a result of the increase in unnecessary energy consumption, energy and financial savings have been ignored. Due to the cost of energy, high bills have emerged. With the increase in energy prices day by day, users have to struggle to solve financial problems. As a result, problems have arisen regarding the efficient and economical use of energy. In order to minimize these problems, users have turned to search and developed many methods to use energy efficiently and maximize efficiency with smart systems. There are many projects and studies in the literature for the development of smart systems and efficient use of energy to minimize high energy costs. In addition, many countries offer solutions and incentives for the development of these systems. Because it is extremely important to take measures to improve the environmental conditions we live in and reduce fossil fuel consumption. In order to minimize the effects of global warming, intensive and efficient use of renewable energy resources is important. It is known that access to electricity is difficult and heating problems are experienced, especially in some rural areas. It has been observed that solar panels installed in these regions provide home heating, hot water and electricity [5]. It is important to implement such applications more frequently in regions where the sun is intense. Solar energy is one of the renewable energy production sources and does not leave any harmful waste. Therefore; various methods and designs have been developed to provide maximum efficiency in solar energy. Generally, solar panels are positioned at fixed angles and maximum efficiency is not obtained from the sun. In order to solve this problem, dual-axis solar photovoltaic (PV) panels are used to track the sun and improve system performance [6-7]. However; the controller designs developed for the designed solar-powered mechanisms to work with high performance are very important. Different programming cards are preferred for the control of the system. The Arduino card is frequently used to control the system and develop smart designs. For instance, this card is used in energy optimization and management [8]. Additionally, Arduino cards are preferred in various applications, including the control of IoT-based smart solar energy systems [9-10], the analysis phase of solar energy systems [11], the management of buildings that rely entirely on renewable energy for their energy consumption [12-13], the control of hybrid dryers powered by biomass and solar energy [14], and methods developed to enhance the performance of PV systems.

Apart from the use of renewable energy sources, monitoring them by remote access is also important. Energy consumption and monitoring are carried out using the IoT (Internet of Things) system [15]. Remote access to information about the system allows the development of appropriate control methods. Keeping energy savings at optimum values can be achieved by constantly monitoring these systems. Therefore; IoT technology is frequently used in industry and applications [16]. Examples include IoT-based smart campus applications developed using hybrid renewable energy [17], IoT-based cybersecurity frameworks proposed to ensure the security of designed renewable energy systems [18], agricultural applications [19], and IoT-based designs enabling the monitoring of the developed system [20].

This study consists of four main sections: Introduction, Materials and Methods, Results and Discussions and Conclusions. In the Introduction section; information about the importance of the system designed in the study and the scope of the study is given. In the Materials and Methods; information about the equipment used is provided and also the working principle of the systems designed using natural gas and renewable energy is mentioned. In the Results and Discussions section; the application results of the designed system are given. The data realized at different stages are evaluated. Finally, in the Conclusions section; a general evaluation is given in a summary form. In this section, suggestions are also made regarding future studies on the subject in the light of the knowledge and experiences gained throughout the this study.

2. Materials and Methods

This section provides information about the equipment used and the system design in the study. The Arduino IoT Cloud Platform used to enable internet access for the heating system, the structure of the Wemos D1 R2 ESP8266 board, the sensors employed for obtaining temperature and humidity data, and the hybrid heating systems are addressed sequentially.

2.1. Arduino IOT Cloud Platform

With the increasing focus on network technologies, the internet has become an integral and indispensable part of daily life. As is well known, the widespread adoption of network technologies has enabled communication between devices used in everyday life, leading to the concept of the Internet of Things (IoT). The Arduino IoT Cloud platform serves precisely this concept. It facilitates remote access to objects and allows users to obtain data from any system created in the web environment. In the heating automation system to be developed, the Arduino IoT Cloud platform enables access to data related to heating values and results derived from the designed system. The Arduino boards to be used in this setup must be ESP32- or ESP8266-based to ensure internet connectivity. In this study, the Wemos D1 R2 board was used to access the data generated by the system via the internet. This board is based on the ESP8266 microcontroller. As shown in the block diagram in Figure 1, users are required to have an account on the Arduino IoT Cloud platform to access the system's data via the internet. The Wemos D1 R2 board used in this study facilitated access to the data by connecting to the Arduino IoT Cloud platform via the internet. In the block diagram shown in Figure 1, energy was regulated using the data obtained from the sensors and control mechanisms, thereby achieving energy efficiency. Additionally, the results derived from this data were transmitted to the internet using the ESP8266-based Wemos D1 R2 board and accessed through the Arduino IoT Cloud platform.



Figure 1. Block Diagram for Heating Automation Internet Access

As seen in the block diagram of the heating automation system, the data obtained from the sensors requires the use of the WEMOS D1 R2 ESP8266 board, and the user must access the data via the Arduino IoT Cloud through internet connectivity. By enabling this access, user control and energy efficiency will be achieved.

2.2. Wemos D1 R2 ESP8266 Board

The Wemos D1 R2 ESP8266 board is similar to an Arduino board but is Wi-Fi based. It operates with 3.3V power and may require an additional power source if the number of sensors connected to it increases.

Compared to Arduino, it has 11 digital input/output pins and 1 analog pin. Due to its Wi-Fi capability, the Wemos D1 R2 board allows data to be collected from various platforms, providing information about the system. In our application, the board, programmed on the Arduino IoT Cloud platform, enables the system data to be monitored at any time and location via internet connectivity. The Arduino IoT Cloud platform, which supports various Wi-Fi module-based boards, enables the visualization of the data obtained from this system. The structure of the Wemos D1 R2 ESP8266 board is shown in Figure 2.



Figure 2. Wemos D1 R2 ES8266 Board

2.3. DTH11 Temperature and Humidity Sensors

The Arduino-compatible sensor is used for temperature and humidity measurement. After the Arduino circuit is connected, the microcontroller on the Arduino reads the values from the sensor, and components such as valves and motors operate accordingly. The system is controlled based on the data obtained from these measurements. In this study, the temperature and humidity sensor shown in Figure 3 has been used.



Figure 3. DHT11 Temperature and Humidity Sensor

The primary purpose of using the sensor is to accurately obtain both the internal temperature and humidity values of the environment, as well as the external temperature and humidity values. Based on these readings, a method and approach are designed to operate the system. The microcontroller processes the data obtained from the sensor using a specific algorithm, ensuring that the system operates in synchronization with the data.

2.4. Hybrid Heating Systems

Renewable energy sources are preferred as cheap, alternative and clean energy. The most commonly used energy types in this area are known as wind and solar energy. In order to keep energy efficiency at a maximum level, the Figure 4 modeling designed with the AutoCAD program is preferred. There are more than one different mechanism in the system. The control mechanism designed for the optimum operation of the system is important. In such studies; system control is possible with controllers designed using the Arduino microcontroller card. The hybrid mechanism given in Figure 4 includes natural gas energy and solar energy. One of the main purposes of this system design is to ensure that the user benefits from the solar energy system at the maximum level. Hybrid heating systems can be used in places such as homes, greenhouses and swimming pools.

When the working principle of the system is examined; firstly the water in the solar energy system is sufficiently heated, then the circulation pumps are activated. Finally; the heat energy is released to the exchangers. As seen in Figure 4; when the solar energy system is activated, the stages of the circulation pumps are adjusted and the average heat value in the house is determined by the user. There are two different types of energy in the system. Energy types are activated according to different situations. The operation of the system is completely controlled by the user.



Figure 4. Hybrid Modeling in Heating System

In the heating system; the water heated by the solar collectors, passes through the exchanger plates and transfers its heat to the radiator line on the opposite side. The radiator line distributes the heat with the circulation pump that circulates its heat and then the heated water cools down again. Finally; the cooled water returns to the system and continues to work by heating up in the exchanger plates. This system continues to work in a cycle. The check valves and strainers used in the system are intermediate elements used entirely for the safety of the system and to extend its service life. Exchangers are the heat transfer elements of the system and the exchanger size changes completely according to the size of the system to be used. In fact, the size of the exchangers to be used in the systems changes in direct proportion to the size of the system. In the heated hybrid modeling given in the figure above; the heating energy obtained with natural gas or any other type of fuel is deactivated and when the weather is sunny, the heating energy obtained from the solar collector saves on fuel type, reduces fuel consumption against environmental pollution and also saves the user from the bill burden.

3. Results and Discussion

In this study; the system was designed with a solar energy collector and the maximum benefit was tried to be obtained from the heat energy obtained by heating the water. The system that was established is a hybrid system design that works with both natural gas and solar energy. In cases where there is no sun; a mechanism was designed that will automatically activate the natural gas system with the programming developed in the microcontroller card Arduino. At the same time; when the sun is effective, the solar energy system is activated; the system fed by natural gas or other energy sources is prevented from working. Therefore; in sunny weather, only solar energy is activated and the aim is to use only renewable energy sources effectively and efficiently in the system.

The experimental set modeling that provides the effectiveness of solar energy on heating systems and the high efficiency of the engine used is given in Figure 5. The application set includes 1 solar collector, 1 radiator, 2 circulation pumps and 1 heat exchanger. The main purpose of this experimental set is to ensure that the system works more efficiently by making transitions between the stages of the circulation pumps and also to produce solutions to problems that may occur in the automation system. Cold water circulating in solar collectors; heats up by passing through the collectors. Therefore; heat energy obtained from solar energy is released as heat in the exchanger system with the help of circulation pump. This heat passing through the exchanger plates provides the heating of cold water coming from radiators. Thanks to the circulation pump on the cold water on the radiator line, it ensures that the water heated in the exchanger is compressed in the radiators and distributes the heat energy on the radiator.



Figure 5. Modeling of the System Used in the Experiment

A solar collector consisting of 16 collectors is seen in Figure 6. The cold water passing through this solar collector is heated and converted into heat energy in the system. There is a cold inlet line and a hot water outlet line on the collector. In the experiment, the solar collector was set to the full south direction in order to provide maximum benefit. There are also more suitable situations to provide this maximum benefit. In Figure 7, the heat energy obtained in the solar heating system transfers heat energy to the radiator by releasing its heat to the exchanger. For the data planned to be obtained here, there are three different stages in the circulation motor on the solar collector. The effects of these motor stages on the system were analyzed. In order to analyze the effects of the circulation pump stages on the system, data was collected and the automation system was designed by taking this data as a reference.



Figure 6. Solar Collector Used in the Experiment

As seen in Figure 7; there is a circulation pump on the lines belonging to a radiator and a solar collector. The circulation pump on the hot water line that comes from the solar collector heats up and circulates the water and the heated water is converted into heat energy by means of the exchanger. The heated water is transferred to the radiator by the circulation of the water on the hot water line that comes from the exchanger plates heats up and heat energy is created.



Figure 7. Heat Exchanger and Radiator Used in the Experiment

The cooled water is heated by passing through the solar collector. The main function of the circulation pump is to ensure that the water circulates. The application was carried out using 1 heat exchanger, 2 circulation engines and 1 radiator. Here, the engine was operated in three stages and the results were compared.

3.1. Circulation Pump Stage 1 Results

The solar heating system used in the experiment was operated in three different stages of circulation pumps on different days and times. As seen in the Figure 8; the circulation pump was operated in the first stage. The heat values left by this stage on the exchanger and radiator during the day are given. Figure 8 was obtained by operating the circulation pumps in the Stage 1 between 11:45 and 13:00 on April 19, 2024. The data was obtained from DTH22 humidity and temperature sensors compatible with the Arduino microcontroller. The temperature data obtained in 1 minute and 40 seconds with the microcontroller was taken from the system. While the pumps were operating in the Stage 1, a temperature difference of 1.5 Degrees Celsius was calculated between the average heat energy released to the exchanger and radiator.



Figure 8. Stage 1 Results of the System (On April 19, 2024 between 11:45-13:00)



Figure 9. Stage 1 Results of the System (On April 19, 2024 between 13:00-14:30)

Hour	Temperature (°C)	Real Feel Temperature (°C)
03:00	5 °C	2 °C
06:00	5 °C	1 °C
09:00	16 °C	12 °C
12:00	19 °C	19 °C
15:00	20 °C	19 °C
18:00	17 °C	15 °C
21:00	11°C	7 °C
00:00	7 °C	3 °C

Table 1. The Weather Conditions for Hakkari on April 23, 20	024
-------------------------------------------------------------	-----

The results presented in Figure 9 were obtained by operating the circulation pumps at the Stage 1 between 13:00 and 14:30 on April 19, 2024. Data was collected using DTH22 temperature and humidity sensors, which are compatible with the Arduino microcontroller. While the circulation pumps were operating at the Stage 1, there was a temperature difference of 1 Degree Celsius between the average heating energy transferred to the heat exchanger and the radiator.

The weather conditions for the province of Hakkari on April 23, 2024, are presented in Table 1 As shown in the weather data, the highest temperatures of the day occurred between 12:00 and 15:00. The maximum temperature during the day reached 19 degrees Celsius.



Figure 10. Stage 1 Results of the System (On April 23, 2024 between 09:45-15:15) Figure 10 was obtained by operating the circulation pumps at the Stage 1 between 09:45 and 15:15 on April 23, 2024. Temperature data was collected from the system by the microcontroller for a duration of 3 minutes and 20 seconds. Upon examining Figure 10, it can be seen that maximum efficiency was achieved between 12:00 and 15:00.

3.2. Circulation Pump Stage 2 Results

In the designed system, the circulation pumps were operated at the Stage 2 during different time intervals. Here, an analysis of the heat energy values transferred to the heat exchanger and radiator was conducted.



Figure 11. Stage 2 Results of the System (On April 20, 2024 between 13:50-14:38)

The heating values transferred by this stage to the heat exchanger and radiator are presented in the figure below. On April 20, 2024, between 13:50 and 14:38, the motor was operated while the circulation pumps were at the second stage, and the results obtained are shown in Figure 11. According to the obtained data, an average temperature difference of 1.07 degrees was observed over the 1 minute and 40 seconds of recorded temperature data.

Hour	Temperature	Real Feel Temperature
03:00	<u> </u>	2°C
06:00	6 °C	2 °C
09:00	16 °C	12 °C
12:00	20 °C	18 °C
15:00	21 °C	19 °C
18:00	19 °C	16 °C
21:00	14°C	11 °C
00:00	9 °C	5 °C

Table 2.	The Weather	Conditions for	r Hakkari on A	pril 26, 2024.
----------	-------------	----------------	----------------	----------------

In Table 2, the weather conditions for Hakkari on April 26, 2024, are presented. As shown in the weather data, the highest temperatures of the day occurred between 12:00 and 15:00. Therefore, the system's highest performance was achieved during this time interval. On April 24, 2024, the circulation pumps were operated at the second stage between 10:15 and 16:55, and Figure 12 was obtained.



Figure 12. Stage 2 Results of the System (On April 26, 2024 between 12:00-15:00)
Data was periodically collected from the microcontroller every 3 minutes and 20 seconds. According to the results obtained at the first stage, the results from the Stage 2 were found to be better. Upon examining Figure 12, it is understood that the maximum efficiency was achieved between 12:00 and 15:30. Based on these data, an average temperature difference of 1.10 degrees was calculated between the temperature readings taken every 3 minutes and 20 seconds.

3.3. Circulation Pump Stage 3 Results

In this section, the circulation pumps were operated at the Stage 3 on different days and times. The aim here is to examine the heat energy values transferred to the heat exchanger and radiator by operating the circulation pumps at the third stage. The heating energy values transferred by this stage to the heat exchanger and radiator are presented in Figures 13 and 14 below.



Figure 13. Stage 3 Results of the System (On April 19, 2024 between 11:00-13:15)

On April 16, 2024, the circulation pumps were operated at the third stage between 11:00 and 13:15, and Figure 13 was obtained. Data was periodically collected from the system via the microcontroller every 1 minute and 40 seconds. According to the obtained data, it was observed that the operation of the pumps at the third stage resulted in a smaller temperature difference between the heat exchanger and the radiator compared to other stages, with a difference of 0.51 degrees.

Hour	Temperature	Real Feel Temperature
	(°C)	(°C)
03:00	7 °C	3 °C
06:00	7 °C	3 °C
09:00	17 °C	14 °C
12:00	21 °C	22 °C
15:00	22 °C	22 °C
18:00	19 °C	18 °C
21:00	15°C	13 °C
00:00	10 °C	7 °C

Table 3. The Weather Conditions for Hakkari on April 25, 2024

Table 3 presents the weather conditions for Hakkari province on April 25, 2024. As shown in the weather report, the highest temperatures of the day were recorded between 12:00 and 15:00. Consequently, it was observed that the hours during which the system achieved optimal efficiency were between 12:00 and 16:00. On April 25, 2024, the circulation pumps were operated in the Stage 3 between 08:00 and 16:40, as depicted in Figure 14. The microcontroller collected data from the system every 3 minutes and 20 seconds. Upon analyzing the results, it was found that the best outcomes for the system occurred in the Stage 3. Additionally, maximum efficiency was observed between 12:00 and 16:30.



Figure 14. Stage 3 Results of the System (On April 25, 2024 between 08:00-16:40)

As a result of the increase in the motor stages within the system, it has been observed that the difference between the heat values released to the heat exchanger and the radiator is decreasing, and the amount of heat released is directly proportional to the increase in the motor stages.

4. Conclusions

In this study; an automation system design that provides maximum performance has been carried out in order to minimize the harmful effects of fossil fuels on the atmosphere. This smart system provides the opportunity to control mechanical parts and prevent unnecessary energy consumption of the system. Space heating systems are specifically used in indoor spaces and buildings to maintain a balanced indoor temperature. In this study, the aim is to reduce energy costs, utilize resources efficiently, and achieve energy independence by using both renewable energy and natural gas in the space heating system. The system is controlled by the microcontroller added to the system and the user is automatically able to intervene in the system via wireless network access. During the application phase; a hybrid heating system working with solar energy and natural gas has been designed. When there is solar energy, solar panels are actively working. However; when there is no solar energy, natural gas is activated. In our automation system, adjustments are made according to the comfort value determined by the user with motor stages. The energy to be obtained from solar energy is designed to be suitable for use in home heating and water heating. The engine was operated in different stages and the heat values released to the heat exchanger and radiator in the stages of the engine were measured and compared. The efficiency status of the engine was observed by comparing the temperature values between the engine stages. Since our work is an efficiency-based smart automation and the engine was operated according to the user comfort value. At the same time; the user was provided with access to the system status via the internet to the data obtained from the sensors in the system. When the results between the stages are analyzed, it is concluded that the best result was achieved by Stage 3. In Stage 1, the radiator temperature was approximately 39°C, in Stage 2 it was approximately 40°C, and in Stage 3 it was approximately 43°C. The differences between these stages vary according to the user's preferences. This method is particularly recommended for space heating systems. The smart automation system developed in our study can be developed with artificial neural networks and adaptive control mechanisms. An example can be given by training the weather data obtained in previous years of a region with artificial neural networks and making optimum system designs. This designed system can be realized with a 3-stage hybrid system on generating electrical energy.

References

- [1] Uçkan İ, Yakın A, Behçet R. Second law analysis of an internal combustion engine for different fuels consisting of NaBH4, ethanol and methanol mixtures. International Journal of Hydrogen Energy 2024; 49:1257-1267.
- [2] Yakın A, Behçet R. Effect of different types of fuels tested in a gasoline engine on engine performance and emissions. International Journal of Hydrogen Energy 2021; 46(66): 33325-33338.
- [3] Uçkan İ, Yakın A, Cabir B. Investigation the performance of a new fuel produced from the phthalocyaninegasoline mixture in an internal combustion engine. International Journal of Hydrogen Energy 2024; 71: 884-893.
- [4] Yakın A, Behcet R, Solmaz H, Halis S. Testing sodium borohydride as a fuel additive in internal combustion gasoline engine. Energy 2022; 254: 124300.
- [5] Rahimoon AA, Abdullah MN, Soomro DM, Nassar MY, Memon ZA, Shaikh PH. Design of parabolic solar dish tracking system using arduino. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science 2020; 17(2): 914-921.
- [6] Singh A, Adhav S, Dalvi A, Chippa A, Rane M. Arduino based Dual Axis Solar Tracker. In: Second International Conference on Artificial Intelligence and Smart Energy (ICAIS), Coimbatore, India; 2022.
- [7] Yakın A, Servet Ö. Hidrojenin Ekonomik Yönden İrdelenmesi. Social Mentality And Researcher Thinkers Journal (Smart Journal) 2024; 7(52): 3047-3056.
- [8] Meje KC, Bokopane L, Kusakana K, Siti M. Real-time power dispatch in a standalone hybrid multisource distributed energy system using an Arduino board. Energy Reports 2021; 7: 479-486.
- [9] Chandrasekaran G, Kumar NS, Chokkalingam A, Gowrishankar V, Neeraj P, Khan B. IoT enabled smart solar water heater system using real time ThingSpeak IoT platform. IET Renewable Power Generation 2023; 19(1): 1-13.
- [10] Prasad AR, Shankar R, Patil CK, Karthick A, Kumar A, Rahim R. Performance enhancement of solar photovoltaic system for roof top garden. Environmental Science and Pollution Research 2021; 28(36): 50017-50027.
- [11] Mutie NA. Measurent of solar irradiation densities and solar energy generated using arduino based data logger. UG program. Kenya: The Technical University of Kenya; 2020.
- [12] Chekired F, Taabli O, Khellili ZM, Tilmatine A, de Almeida AT, Canale L. Near-zero-energy building management based on Arduino microcontroller—on-site lighting management application. Energies 2022; 15(23): 9064.
- [13] López-Vargas A, Fuentes M, Vivar M. Current challenges for the advanced mass scale monitoring of Solar Home Systems: A review. Renewable Energy 2021; 163: 2098-2114.
- [14] Rincón-Quintero AD, Del Portillo-Valdés LA, Meneses-Jácome A, Ascanio-Villabona J G, Tarazona-Romero BE, Durán-Sarmiento MA. Performance evaluation and effectiveness of a solar-biomass hybrid dryer for drying homogeneous of cocoa beans using labview software and arduino hardware. In: International Conference on Intelligent Information Technology, Quito, Ecuador; 2020.
- [15] Prakashraj K, Vijayakumar G, Saravanan S, Saranraj S. IoT Based Energy Monitoring and Management System for Smart Home Using Renewable Energy Resources. International Research Journal of Engineering and Technology 2020; 7(2): 1790-1797.
- [16] Siddique AH, Tasnim S, Shahriyar F, Hasan M, Rashid K. The current scenario, challenges and the role of IoT in building a smart distribution grid. Energies 2021; 14(16): 5083.
- [17] Eltamaly AM, Alotaibi MA, Alolah AI, Ahmed MA. IoT-based hybrid renewable energy system for smart campus. Sustainability 2021; 13(15): 8555.
- [18] Rekeraho A, Cotfas DT, Cotfas PA, Bălan TC, Tuyishime E, Acheampong R. Cybersecurity challenges in IoTbased smart renewable energy. International Journal of Information Security 2024; 23(1): 101-117.
- [19] Bouali ET, Abid MR, Boufounas EM, Hamed TA, Benhaddou D. Renewable energy integration into cloud & IoT-based smart agriculture. IEEE Access 2021; 10: 1175-1191.
- [20] Qays MO, Ahmed MM, Parvez Mahmud MA, Abu-Siada A, Muyeen SM, Hossain ML, Rahman MM. Monitoring of renewable energy systems by IoT-aided SCADA system. Energy Science & Engineering 2022; 10(6): 1874-1885.



Adıyaman University Journal of Engineering Sciences Adyü J Eng Sci 2025;12(25):33-43 Adıyaman Üniversitesi

Mühendislik Bilimleri Dergisi

Adyü Müh Bil Derg 2025;12(25):33-43

https://doi.org/10.54365/advumbd.1582412

Research Article / Araştırma Makalesi

Esnek Yol Üst Yapısı Kaplamaların Üretiminde Çevresel Bir Yaklaşım: Odun Talaşının Kullanılabilirliğinin Deneysel Olarak Araştırılması

An Environmental Approach in the Production of Flexible Pavements: Experimental Investigation of the Usability of Sawdust

Halil İbrahim Yumrutaşı*, Mustafa Yurdabal Apak 2¹⁰, Stive Ricardo Dongmo 1¹⁰, Isxaq Osman Abdırahman¹

¹ Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük/Türkiye ² İstanbul GelişimÜniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Avcılar, İstanbul/Türkiye

Öz

Son yıllarda dünya genelinde artan üretim ve tüketim miktarlarına bağlı olarak atıkların depolanması ve bertarafı önemli bir sorun olarak ortaya çıkmıştır. Çeşitli çevresel yaklaşımlarla bu atıkların geri dönüştürülmesi ile elde edilen farklı yan ürünlerin kullanımı teşvik edilmektedir. Bu çalışmada ağaçların işlenilmesinden elde edilen yan/atık ürün olan odun talaşının bitümlü sıcak karışım yol üst yapısı kaplama üretiminde kullanılabilirliğinin deneysel olarak arastırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, sıcak karışımdaki agrega yerine, %5, %10 ve %15 oranlarında iri agrega, ince agrega ve mineral filler boyutlarında odun talaşı kullanılarak numuneler elde edilmiştir. Bu numuneler, TS EN 12697 standardına göre Marshall testine tabi tutularak stabilite ve akma değerleri elde edilmiştir. Karayolu Teknik Şartnamesi uyarınca elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde optimum sonucun %4.3 bitüm oranına sahip %10 filler boyutunda odun talaşı ikamesi içeren 4.3FI10 numunesinde elde edildiği görülmüştür. Buna göre kontrol numunesine oranla stabilite açısından yaklaşık %27'lik bir iyileşme sağladığı, akma değerinde ise kayda değer bir fark oluşturmadığı görülmüştür. Elde edilen sonuç filler boyutunda odun talaşının bir yan ürün olarak sıcak asfalt betonu karışımlarda kullanılabileceğini ortaya koymuş olup çalışmanın çevresel anlamda atık/yan ürün yönetimi çabalarına katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Esnek yol üstyapısı, Asfalt betonu, Odun talaşı, Marshall test, Atık yönetimi

Abstract

In recent years, the storage and disposal of waste have emerged as an important problem due to the increasing production and consumption of waste worldwide. Using different by-products obtained by recycling these wastes is encouraged with various environmental approaches. This study aimed to investigate the usability of wood sawdust, which is a by-product/waste product obtained from the processing of wood, in the production of bituminous hot mix asphalt pavements. In this context, samples were obtained by using 5%, 10% and 15% coarse aggregate, fine aggregate and mineral filler-sized wood sawdust instead of aggregate in the hot mix asphalt concrete. These samples were subjected to the Marshall test according to TS EN 12697 standard and stability and flow values were attained. When the results obtained in accordance with the Highway Technical Specification were evaluated, it was seen that the optimum result was obtained in the 4.3FI10 sample containing 10% filler-sized wood sawdust substitution with a 4.3% bitumen ratio. Accordingly, it was observed that it improved approximately 27% in terms of stability compared to the control sample, and that there was no significant difference in the flow value. The results revealed that filler-sized wood sawdust can be used as a by-product in hot mix asphalt pavements, and it is hoped that the study will contribute to environmental waste/by-product management endeavors.

Keywords: Flexible pavement, Asphalt concrete, Sawdust, Marshall test, Waste management

* Sorumlu yazar e-posta (Corresponding e-mail): <u>iyumrutas@karabuk.edu.tr</u> Geliş Tarihi (Received):10.10.2024, Kabul Tarihi (Accepted): 07.02.2025

1. Giriş

Atık malzeme yönetimi ve bertarafı, dünya genelinde birçok ülkede ele alınması gereken başlıca bir çevre ve sağlık sorunudur. Dünya çapındaki tüketimin hızla artması nedeniyle, sorun günümüzde daha da önemli hale gelmiştir. Gelişmiş ülkelerin çoğunun bu durumla başa çıkmak için çeşitli önlemler almasına rağmen, atık sorunu giderek daha da büyümektedir. ABD'de üretilen toplam katı atık 2018'de 292.4 milyon ton olup bunun yaklaşık 69 milyon tonu geri dönüştürülmüş, 25 milyon tonu ise kompostlanmıştır (Şekil 1) [1]. AB-27'de tüm ekonomik faaliyetler ve haneler tarafından üretilen toplam atık 2.317 milyon tona ulaşmıştır [2]. Atık üretimi son yıllarda dünya çapında önemli ölçüde artmış ve önümüzdeki yıllarda daha da artacak gibi görünmektedir. 2050 yılına kadar, dünya çapında katı atık üretiminin yaklaşık %70 oranında artarak 3.4 milyar metrik tona ulaşması beklenmektedir. Bunun nedeni, kentleşme, nüfus, ekonomik büyüme, tüketici alışveriş alışkanlıkları ve davranışları gibi çeşitli faktörler olarak sıralanabilmektedir [3,4].



Şekil 1. ABD'de yıllık bazda üretilen katı atık miktarı

Son yıllardaki hızlı endüstriyel ve teknolojik gelişmeler nedeniyle gelecek nesiller, ciddi çevre sorunlarıyla baş etmek zorunda kalacaktır. Doğal kaynakların hızla tüketilmesi, artan çevre kirliliği ve ekolojik dengenin genel olarak bozulması tüm dünyayı etkilemekte ve ciddi önlemler alınmasını gerektirmektedir. Avrupa Atık Çerçeve Direktifi 2008/98/EC'nin atık hiyerarşisine göre, atıkların yeniden kullanımını ve geri dönüşümünü teşvik ederek ve atıkların bertarafını veya yakılmasını aşamalı olarak kaldırarak AB kaynak verimliliğini iyileştirmeye ve iklim ve çevresel etkileri azaltmaya açık bir ihtiyaç vardır [5].

Ahşap (odun) sanayi, yangın ve kuraklık nedeniyle orman miktarının azalması ve yan ürün olarak yüksek miktarda talaş üretilmesi açısından kritik konulardan biridir. Odunun testere vasıtası ile kesilirken düşen küçük bir parçası olan odun talaşı, biyolojik olarak parçalanabilen bir malzemedir. Ancak talaş genellikle imalat sanayinde ahşap levhalar, raflar, ilan panoları, mobil evler için duvar ve çatı kaplamaları gibi hafif yapı malzemeleri için hammadde olarak kullanılmaktadır. Ayrıca soğutma sisteminde izolatör olarak ve enerji endüstrilerinde soğuk muhafazasında, doğrudan veya dolaylı olarak odun gazı, briket, pelet vb. üretmek için de kullanılmaktadır. Fakat odun talaşı bu ve benzeri alanlarda değerlendirilmediği takdirde çevreyi kirleten bir endüstriyel atık olarak kabul edilmektedir [6]. Son yıllarda işlenmiş ahşaba olan talep artışı ahşap endüstrisinin hızlı bir şekilde büyümesine neden olmuştur. Ahşap işleme sırasında ortaya çıkan talaş miktarı, ahşabın türü, kullanılan makineler ve işleme teknikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Tipik olarak talaş, işlenen odun hacminin yaklaşık %10-15'ini oluşturmaktadır. 2018 yılında dünya genelinde yaklaşık olarak 49-74 milyon metreküp talaş üretildiği ifade edilmektedir [18].

Ahşap malzemeler, pencere, kapı, inşaat elemanları, ambalaj ve mobilyalarda kullanılmakta olup cam, metal ve plastik gibi malzemeleri içermektedir. Ayrıca yapıştırıcı, boya, vernik, ahşap koruma ürünleri ve çeşitli kimyasallarla kaplıdır. Ekonomik ve teknolojik açıdan en rasyonel yaklaşım, daha fazla işlenmemiş

talaş ve talaş tozu şeklindeki birincil ahşap işleme malzemelerinin kullanılmasıdır [7]. İnşaat uygulamalarında yan ürün ve kalıntıların değerlendirilmesi, bertaraf problemlerinin azaltılmasında ekonomik ve çevre dostu bir alternatif çözüm olabilir.

İnşaat mühendisliği uygulamalarında özellikle karayolu üst yapı kaplamalarının inşasında, geri kazanılmış asfalt kaplama ve beton agregası, yıkım atıkları, mermer tozu, çimento tozu, kırıntı kauçuk, hurda lastikler, cam, plastik atıklar, çelik cürufları, kömür atıkları, uçucu kül, yakma kül, seramik atıkları, beton atıkları, odun atıkları, tekstil atıkları, atık yağlar gibi birtakım geri dönüştürülmüş ve yan ürün malzemelerin kullanımına yönelik talep artışı olmuştur. Bu uygulamalar, hammadde kullanımının en aza indirilmesine, sera gazlarının (emisyonların) azaltılmasına, sürdürülebilirliğin artırılmasına ve bertaraf sorunlarının dolayısıyla küresel çevre sorunlarının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır [8–11].

Literatürde odun atıklarının asfalt betonlarda kullanılabilirliği ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Odun atıkları karayolu üstyapısı yapımında genellikle iki şekilde kullanılmaktadır. Birincisi kimyasal katkı maddesi (biyo-asfalt bağlayıcı) olarak, ikincisi ise geri dönüştürülmüş atık talaş veya ağaç tozunun yakılarak agreganın belirli bir yüzdesi olarak kullanımı şeklindedir.

Fayıssa vd. [12] talaş külünün asfalt beton üretiminde filler malzemesi olarak uygulanması üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu kapsamda Talaş Tozu Külü (SDA) için çeşitli fiziksel ve kimyasal testler yapılmıştır. Bazalt tozu miktarının %3, %6, %9 ve %12 oranlarında SDA kullanılmıştır. Asfalt betonunun yorulma ömrü, kalıcı deformasyon ve nem hassasiyeti kullanılan SDA miktarı ile iyileşme göstermiştir. Osuya [13], asfalt betonunda bir katkı maddesi olarak talaş külünün etkinliğini değerlendirmiştir. Asfalt beton numuneleri, granit filler maddesinin ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında talaş külü ile hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde Marshall Stabilite testleri yapılmıştır. Talaş külü asfalt betonunun reolojik özelliklerini olumlu yönde ve dikkat çekici bir şekilde etkilemiştir. Yasanthi vd. [14], sıcaklık değişiminin talaşlı sıcak karışım asfalt betonu üzerindeki etkilerini gözlemlemişlerdir. Geleneksel filler malzemesinin yerine kısmen talaş külü kullanılmıştır. Marshall testi sonuçları, talaşlı karışımların yüksek sıcaklıklara daha duyarlı olduğunu ancak buna mukabil talaş tozu külünün düşük sıcaklıklarda filler malzemesinin belirli bir miktarı yerine kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır. Osinubi vd. [15], talaş külünün (SDA) asfalt kaplamalarda alttemel ve taban zemini katmanları olarak kullanılmak üzere geri kazanılmış asfalt kaplamanın (RAP) performansı üzerindeki etkinliğini gözlemlemişlerdir. Numunelere Standart Proctor (SP) ve California Bearing Ratio (CBR) testleri uygulanmıştır. Test sonuçları, RAP'ın mekanik özelliklerinin SDA ilavesi ile olumlu yönde geliştiğini göstermiştir. Dimter vd. [8], odun külü filler asfalt karışımının mekanik özelliklerini ve suya direncini değerlendirmişlerdir. Bu kapsamda Marshall stabilite ve doğrusal olmayan çekme dayanımı testleri uygulanmıştır. Filler içerisindeki %50 biyo-kül içeriği, asfalt karışımın çekme dayanımını, plastik deformasyonlara ve su etkisine karşı direncini artırmıştır. Odun külünün endüstriyel filler maddesinin kısmi ikamesi olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğunu ancak bu alanda daha fazla test/çalışma yapılması gerektiğini vurgulamışlardır. Akter vd. [16], Marshall testi ile asfalt betonunda geleneksel filler maddesine alternatif olarak odun tozu külünün (WPA) performansını gözlemlemişlerdir. Sonuçlar, deformasyona, yorulma ömrüne ve nemin neden olduğu hasarlara karşı daha iyi direnç gösterdiği yönündedir. Araştırmacılar, dolaylı çekme yorulma testi, dört noktalı eğilme testi, tekrarlanan aks yük testi ve tekerlek izleme testi gibi birtakım özellikler hakkında daha fazla araştırma yapılmasını önermişlerdir. Nassef vd. [8] odun talaşını modifiye malzemesi olarak kullanarak asfalt bağlayıcıların ve karışımların performansı üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Asfalt bağlayıcının toplam ağırlığına göre %10, %15 ve %20 oranında talaş ilave edilmiştir. Çalışmada modifiye malzemesi olarak sadece 150 µm elekten (ASTM standardı Elek No. 100) geçen ince parçacıklar kullanılmıştır. Daha sonra talaş modifiyeli asfalt bağlayıcıların mikroyapısal ve kimyasal karakterizasyonlarını gözlemlemek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) testleri yapılmıştır. Bu talaş modifiyeli bağlayıcılarla Sıcak Karışım Asfalt (HMA) numuneleri hazırlanmış ve Marshall, Çekme Dayanımı Oranı (TSR) ve Stabilite Kaybı testleri uygulanmıştır. Marshall stabilitesi talaşlı karışımlarda bir miktar azalma göstermekte ancak limitler içerisinde kalmaktadır. Karışım, stabilite Kaybı ve TSR açısından nem hasarına karşı iyi bir direnç

göstermiştir. Yasanthi vd. [11] karbonize edilmiş (yanmış) talaşın sıcak karışım asfaltta (HMA) filler malzemesi olarak performansını Marshall testi ile incelemişlerdir. Sonuçlar, oksijensiz durumda karbonize edilen talaş tozunun, toplam agrega ağırlığının %2.74'üne kadar HMA betonundaki geleneksel filler malzemesinin yerini almak için kullanılabileceğini göstermiştir. Jegatheesan [12], Sıcak Karışım Asfaltın (HMA) toplam agrega ağırlığının %1.77'si, %2.73'ü ve %3.75'i ile 1.18 mm (filler malzemesi olarak) olan karbonize edilmiş (yanmış) odun talaşının (CWD) uygunluğunu Marshall Metodu uygulayarak araştırmıştır. CWD modifiyeli sıcak karışım asfaltta Marshall Stabilitesi azaltılmıştır ancak sonuçlar minimum gereksinimleri karşılamıştır. Buradan hareketle karbonize edilmiş (yanmış) odun talaşının geleneksel filler malzemesi ile değiştirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bao vd. [17], odun atıklarından elde edilen biyo-asfaltın reolojik özelliklerini ve kimyasal bileşimini araştırmışlardır. Sonuçlar, odun atığından yapılan biyo-asfalt bağlayıcının özelliklerinin petrol bazlı asfaltınkine benzer olduğunu, dolayısıyla odun atığından elde edilen biyo-asfalt bağlayıcının petrol bazlı asfalt bağlayıcıyı temsil edebileceğini ortaya koymuşlardır. Turobova [13], bitüm modifikasyonu için ağaç işleme endüstrisi atığını (ahşap filler katkı maddesi) kullanmıştır. Ahşap filler malzemesi olarak ortalama tane boyutu 0.5-1 mm aralığında olan Sarıçam Ağacının kabuğu kullanılmıştır. Ahşap filler katkı maddesinin kullanılması, organik bağlayıcının termal ve fiziksel özelliklerini (yumuşama sıcaklığı ve kırılma sıcaklığı) ivileştirmiştir.

Özetlemek gerekirse, literatürde odun talaşı çoğunlukla yakılarak kül haline getirilip sıcak karışım asfaltta filler malzemesi olarak ve ayrıca asfalt bağlayıcıların modifiye edilmesinde kullanılmaktadır. Talaşın doğrudan (yakılmadan) iri, ince ve filler boyutlarında agrega olarak kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanılamamıştır. Dolayısıyla bu çalışma, konusuyla yenilikçiliğini ve özgün değerini ortaya koymaktadır.

2. Deneysel Metodoloji

2.1 Ön Deneyler

Deney metodolojisinin sağlıklı olarak belirlenebilmesi amacıyla iki önemli ön araştırma sorusuna cevap arama ihtiyacı doğmuş ve bu doğrultuda birtakım ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Odun malzemesi yanıcı özelliklere sahip bir malzeme olup üretim prosesine bağlı olarak agrega ve bitüm, sıcak karışım elde etmek amacıyla 160 °C'lere varan sıcaklıklara maruz kalabilmektedir. Çalışmada kullanılacak olan ahşap talaşı ise agrega yerine ikame edilecek olup bu karışım sıcaklıklarından nasıl etkileneceğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu ön araştırma sorusuna cevap aramak amacıyla iki adet ön deney gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan odun talaşı Safranbolu Sevingen Orman Ürünleri Firmasından ve bitüm malzemesi ise Karabük İl Özel İdaresi Asfalt plentinden temin edilmiştir. İlk ön deney, Şekil 2a'da farklı boyutlardaki talaş malzeme üzerine 160 °C ısıya sahip bitüm dökülerek talaşın yüksek sıcaklık karışım sıcaklığına dayanıklı olduğu ve önerilen hipotez için odun talaşının kullanılmasına engel bir durum olmadığı kanıtlanmıştır. Sonrasında diğer deneyle ise talaş numuneler etüvde 3 saat boyunca 160 °C sıcaklıkta tutulmuş ve sonuç olarak bitümlü sıcak karışım (BSK) sıcaklıklarına dayanıklı olduğu görülerek talaş malzeme açısından riskli sıcaklık değerinin gözlemlendiği ön deney safhası tamamlanmıştır (Şekil 2b).



Şekil 2. Ön deney sonuçları

İkinci önemli ön araştırma sorusu ise iri, ince ve filler boyutlarında olmak üzere agrega yerine kullanılacak olan odun talaşı miktarının uygun oranlarının tespiti olup bu sorunun cevabının bulunabilmesi için öncelikle %30 ve %20 oranlarında talaş içeren numuneler üretilerek Marshall testlerine tabi tutulması planlanmıştır. Bunun için farklı oranlarda %4, %5, %6 oranlarında bitüm kullanılarak numuneler hazırlanmış ancak numunelerin bir kısmı henüz daha kalıptan çıkarılamadan dağılmış (Şekil 3a), bir kısmı ise kalıptan başarıyla çıkmış ancak su banyosunda ısıtıldığında dağılmış (Şekil 3b) ve Marshall stabilite testlerine tabi tutulamamıştır.



Şekil 3. a) Kalıptan çıkamadan dağılan numune örneği (%30 talaş ikamesi) b) Su banyosunda dağılan numune örneği (%20 talaş ikamesi)

Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek ikame talaş miktarları açısından %5, %10 ve %15 oranlarının yeterli ve uygun olacağı kararlaştırılmıştır. Çizelge 1'deki deney matrisi dikkate alınarak deneylere başlanmıştır. Deney metodolojisine ait akış şeması ise Şekil 4'te sunulmuştur.

Çizelge 1. Deney Matrisi								
Donov Türləri	İkame Oranları							
Deney Tullell		10%	20%	30%				
Kontrol numunesi	CS*	-	-	-				
İri agrega ile ikame edilen odun talaşı miktarı	-	CA10*	CA20*	CA30*				
İnce agrega ile ikame edilen odun talaşı miktarı	-	FA10*	FA20*	FA30*				
Filler ile ikame edilen odun talaşı miktarı	_	FI10*	FI20*	FI30*				
* Her bir deney türü için en az 3 başarılı numune üretilecektir								



Şekil 4. Çalışmanın metodolojisi

2.2 Marshall Deneyleri

Bu safhada ilgili numunelerin TS EN 12697 standardı [19] doğrultusunda hazırlanması ve stabilite/akma deneylerine tabi tutulabilmesi amacıyla malzeme temini sağlanmıştır. Bu doğrultuda gerekli odun talaşı Safranbolu Sevingen Orman Ürünleri Firmasından temin edilmiştir. Bu çalışmada çam ağacından elde edilen talaş malzemesi deneylerde kullanılmakla birlikte gelecek çalışmalarda farklı ağaç türlerine ait talaş kullanımının etkisinin de araştırılması önerilmektedir.

AC50/70 penetrasyon değerine sahip bitüm ve 0-5mm, 5-12 mm ve 12-25 mm aralıklı agregalar Karabük İl Özel İdaresi asfalt plentinden temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan bitümün karakteristik özellikleri Çizelge 2'de, agregaların karakteristik özellikleri ise Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 2. Deneylerde kullanılan bitümün karakteristik özellikleri								
Deney Adı	Birim	Ref. Sınır Değeri	Bağıl Belirsizlik % ± (1)	Deney Sonuçları	Deney Yöntemi			
Penetrasyon, 25°C'ta, 100g, 5 sn. (Otomatik)	x0.1 mm	50 - 70	4.61	59	TS EN 1426			
Yumuşama Noktası (Su banyosu), (Otomatik), (pt 100)	°C	46 - 54	2.51	48.8	TS EN 1427			
Sertleşmeye Karşı Direnç, 163°C'ta								
Kütle Değişimi	%	(-)0.5	55	(-) 0.03	TS EN 12607-			
Kalıcı Penetrasyon	%	≤ 50	4.61	65	1			
Yumuşama Noktası Yükselmesi	°C		2.51	4.2				
Parlama Noktası	°C	≤ 230	2.2	338	TS EN ISO 2592			
Çözünürlük (Toluen, cam fiber filtre)	%(m/m)	99	0.03	99.85	TS EN 12592			

Ocak Adı	Cumayanı Taş Ocağı				
Kayacın cinsi	Kalker				
Deney Adı	Kaba Agrega	İnce Agrega	Filler	Deney Standardı	
Hacim Özgül Ağırlığı	2.696	2.649		TS EN 1097-6	
Zahiri Özgül Ağırlığı	2.737	2.745	2.756		
Absorpsiyonu, %	0.5	1.3			
Karışımın Efektif Özgül Ağırlığı (deneyle)			2.711	ASTM D-2041	
Karışımın Efektif Özgül Ağırlığı (hesapla)			2.711		
Cilalanma Değeri				TS EN 1097-8	
Micro-Deval				TS EN 1367-1	
MgS04 Donma Kaybı %			18	TS EN 1367-2	
Los Angeles Aşınma Kaybı,%			21	TS EN 1097-2	
Yassılık İndeksi,%			12.7	BS 812	
Soyulma Mukavemeti			65/70	KTŞ Kısım 403 Ek-A	
Bitüm özgül ağırlığı			1.03	TS-1087	
Bitüm Penetrasyonu, dmm			60	TS EN 1426	
Yumuşama Noktası, 0 C				TS EN 1427	
İmalatta Kullanılacak Bitümlü Bağlayıcı			Rafinerisi	Kırıkkale	
			Tipi	Bitüm	
			Sınıfı	B 50/70	

Çizelge 3. Deneylerde kullanılan agreganın karakteristik özellikleri

Malzeme temini sonrası ilk adım olarak optimum bitüm oranının belirlenmesine çalışılmıştır. Bunun için öncelikle elek analizleri gerçekleştirilerek agregalar Karayolları Teknik Şartnamesinde verilen ilgili elek boyutlarında elde edilmiştir. Bu safhada, daha sonra kullanılacak olan talaş malzemeler de elek işlemine tabi tutulmuştur.

Sonrasında kontrol numunesi için optimum bitüm muhtevasının tespit edilebilmesi ve dizayna esas miktarların belirlenmesine yönelik Marshall testleri gerçekleştirilmiştir. Bu safhada 6 adet Marshall numunesi üretilerek optimum bitüm oranı %4.3 olarak tespit edilmiştir.

Optimum bitüm oranın belirlenmesinden sonra Çizelge 1'de sunulan deney matrisine göre TS EN 12697 Marshall Deney standardı ve Karayolları Teknik Şartnamesi dikkate alınarak ilgili numuneler üretilmiştir. Marshall standardına göre agregalar 110 \pm 5 °C' de en az 1 saat boyunca etüvde kurutulmalı ve ısıtılmalıdır, bitüm ise 150 \pm 5 °C' ye kadar 3-5 saat boyunca etüvde ısıtılmalıdır. Bu durum göz önünde bulundurularak talaş malzeme de dahil olmak üzere tüm karışım malzemeleri ilgili süre ve sıcaklıklarda etüvde bekletilmiştir.

Malzemelerin etüvde ısıtılmasından sonra bitüm, agregalar ve odun talaşı, ısıtıcılı mikserde karıştırılarak kompaksiyon ısısı olan 150 °C de karışım elde edilmiştir. Bu safhada karışımın ısısı elektronik bir çubuk (prob) termometre vasıtasıyla izlenmiştir.

Isıtıcılı mikserde elde edilen karışım sıcak olarak etüvden çıkarılan Marshall kalıplarına vakit kaybetmeksizin dökülmüş, şişleme işlemi ile numunenin homojenliği sağlanmaya çalışılmış ve standartta belirtildiği şekliyle her iki yüze 75 defa olacak şekilde tokmaklanarak kompaksiyon işlemi tamamlanmıştır.

Her bir deney için 3'er adet numune üretilmiş olup kalıba yerleştirilerek kompaksiyon işlemi tamamlanan numuneler, oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ve standartta bahsedilen süre içerisinde kalıp çıkarıcı

ile kalıplardan çıkarılarak bir kumpas yardımıyla boyut ölçümleri yapılmıştır. Sonrasında ise Marshall testine tabi tutulabilmesi için 60 °C su banyosunda 45 dk bekletilmiştir. Su banyosundan çıkarılan numuneler Marshall cihazına yerleştirilerek stabilite ve akma sonuçları elde edilmiştir.

Tüm bu işlem adımları Çizelge 1'de belirtilen deney matrisinde yer alan bütün numunelere uygulanmıştır. Çalışmanın bu safhasında, odun talaşının organik bir malzeme olması ve bitüm ihtiyacını etkileyebilecek olması ihtimali göz önünde bulundurularak bitüm miktarının da sonuçlar üzerinde etkisinin olabileceği değerlendirilmiştir. Buna istinaden tüm deneyler optimum bitüm oranı olan %4.3'e ilave olarak %3.5, %5 ve %6 oranlarında olmak üzere tekrarlanarak yeni deney süreçleri geliştirilmiştir. Bitüm oranları da dikkate alınarak ortaya çıkan en son deney matrisi Çizelge 4'te, takip edilen tüm işlem adımlarına ilişkin görsel iş akış şeması ise Şekil 5'te sunulmuştur.

	Çizelge 4. Revize edilmiş deney matrisi								
			BİTÜM Mİ	KTARI					
		3.50%	4.30%	5.00%	6.00%				
			KOMPAK	SİYON					
		75x2	75x2	75x2	75x2				
Talaşsız	KONTROL NUMUNESİ		CS						
	İri agrega	3.5CA5	4.3CA5	5CA5	6CA5				
% 5 talaş	İnce agrega	3.5FA5	4.3FA5	5FA5	6FA5				
	Filler	3.5FI5	4.3FI5	5FI5	6FI5				
	İri agrega	3.5CA10	4.3CA10	5CA10	6CA10				
% 10 talaş	İnce agrega	3.5FA10	4.3FA10	5FA10	6FA10				
	Filler	3.5FI10	4.3FI10	5FI10	6FI10				
	İri agrega	3.5CA15	4.3CA15	5CA15	6CA15				
% 15 talaş	İnce agrega	3.5FA15	4.3FA15	5FA15	6FA15				
	Filler	3.5FI15	4.3FI15	5FI15	6FI15				



Şekil 5. İşlem adımlarına ait görsel iş akış şeması

3. Sonuçlar

Çizelge 4'deki deney matrisi dikkate alınarak gerçekleştirilen deney sonuçlarından elde edilen Marshall deney verileri Çizelge 5'te sunulmuştur.

	Çizelge 5. Marshall deney sonuçları													
		Kontrol Numune		İri agrega	(CA)			İnce agreş	ga (FA)			Filler (FI)		
Ś	Kod	CS	3.5CA5	4.3CA5	5CA5	6CA5	3.5FA5	4.3FA5	5FA5	6FA5	3.5FI5	4.3FI5	5FI5	6FI5
TAI	Stabilite	13.58	*	9.38	8.33	9.14	*	8.09	8.73	10.93	13.54	15.98	13.82	9.19
%5	Akma	4.96	*	8.80	6.85	6.71	*	8.25	8.84	6.54	3.89	4.81	5.47	5.76
LAŞ	Kod	CS	3.5CA10	4.3CA10	5CA10	6CA10	3.5FA10	4.3FA10	5FA10	6FA10	3.5FI10	4.3FI10	5FI10	6FI10
[TA]	Stabilite	13.58	*	*	*	*	*	*	*	*	*	17.31	16.24	12.48
% 10	Akma	4.96	*	*	*	*	*	*	*	*	*	4.65	4.23	4.98
LAŞ	Kod	CS	3.5CA15	4.3CA15	5CA15	6CA15	3.5FA15	4.3FA15	5FA15	6FA15	3.5FI15	4.3FI15	5FI15	6FI15
TA	Stabilite	13.58	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
% 15	Akma	4.96	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
* Ba	ışarısız der	eyleri ifade	etmektedir.											

Çizelge 5'te (*) ile ifade edilen deneyler karışımın kalıptan çıkarılma esnasında dağılması veya su banyosunda bekletilmesi sonrası dağılmasına bağlı olarak Marshall deneyine tabi tutulamayan deneyleri ifade etmektedir.

%5 talaş ikamesi içeren numuneler değerlendirildiğinde; iri agrega ve ince agrega boyutlu talaş içeren numunelerin stabilite değerlerinin kontrol numunelerine oranla belirgin bir düşüş (%40 - %20) sergilediği, akma değerlerinin ise kontrol numunesine oranla oldukça yüksek bir artış (%32 - %78) sergileyerek şartname limitleri açısından yetersiz kaldığı görülmüştür. Filler boyutunda talaş içeren numunelerin stabilite değerlerinin kontrol numunelerine oranla minimum %32 düşüş ile maximum %18 artış sergilediği görülmüş olup %5 talaş içeren numunelerde en iyi sonuç %4.3 bitüm oranına sahip %5 filler boyutunda talaş ikamesi içeren 4.3FI5 numunesinden elde edilmiştir.

%10 talaş ikamesi içeren numuneler değerlendirildiğinde; iri agrega ve ince agrega boyutlu talaş içeren numunelerin su banyosunda dağılması sebebiyle Marshall testlerine tabi tutulamamış dolayısıyla stabilite ve akma değerleri tespit edilememiştir. Filler boyutunda talaş içeren numunelerin stabilite değerlerinin ise kontrol numunelerine oranla minimum %8 düşüş ile maximum %27 artış sergilediği görülmüş olup %10 talaş içeren numunelerde en iyi sonuç %4.3 bitüm oranına sahip %10 filler boyutunda talaş ikamesi içeren 4.3FI10 numunesinden elde edilmiştir.

%15 talaş ikamesi içeren numuneler değerlendirildiğinde numunelerin bir kısmının henüz kalıptan çıkarılma esnasında, bir kısmının ise su banyosunda dağılması sebebiyle Marshall testlerine tabi tutulamamış dolayısıyla stabilite ve akma değerleri tespit edilememiştir.

Elde edilen sonuçlar, ilgili numunelerin değişen bitüm oranları dikkate alınarak değerlendirildiğinde ise tasarıma esas optimum bitüm içeriği olan %4.3 oranı, genel olarak tüm boyutlardaki (iri, ince, filler) talaş içeren numuneler açısından en uygun orandır. Bu oranın kullanıldığı testlerde, stabilite ve akma değerleri sağlanmış olup odun talaşının özellikle filler boyutunda ikamesinin, karışımın bitüm miktarı açısından herhangi ilave bir ihtiyaç doğurmayacağı ve ekonomik açıdan bir mahzur olmayacağı değerlendirilmiştir.

Tüm deney sonuçları dikkate alındığında stabilite ve akma değerleri açısından en uygun sonucun filler ile ikame edilen talaş miktarları için ortaya çıktığı görülmektedir. Hem stabilite değeri hem akma değeri hem de performans açısından kullanılabilecek maksimum miktar açısından en uygun oran olarak %4.3 bitüm oranına sahip %10 filler boyutunda talaş ikamesi içeren 4.3FI10 numunesi optimum numune olarak tayin edilmiştir.

4. Tartışma ve Değerlendirme

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, odun talaşının sıcak asfalt karışımlarda Marshall stabilitesi ve akma değerleri açısından kullanımının fizibil olduğunu ortaya koymuştur. Buna göre;

- Deney sonuçları iri ve ince agrega boyutlarında kullanılan ikame odun talaşından ziyade özellikle filler boyutunda odun talaşı ikamesinin daha anlamlı sonuçlar çıkardığını göstermiştir.
- Değişen bitüm miktarının sonuçlar üzerindeki etkisi sınırlı olmakla birlikte başlangıçta seçilen tasarıma esas optimum bitüm muhtevasının korunmasının uygun olduğu görülmüş, en iyi sonuçlar optimum bitüm oranında elde edilmiştir. Buradan hareketle odun talaşı içeren numunelerin ilave bitüm ihtiyacı doğurmadığı ve ekonomik açıdan herhangi bir kaygı oluşturmadığı değerlendirilmiştir.
- Çalışmada kullanılan odun talaşı bir atık/yan ürün olup elde edilen sonuçların hem geri dönüşüm ve atık bertarafı gibi çevresel çabalara katkı sağlayacağı hem de maliyet etkin bir çözüm olarak değerlendirilebileceği görülmüştür.
- Çalışmada çam ağacından elde edilen odun talaşı kullanılmış olup farklı ağaç türlerine ait talaş kullanımları ile mukayeseli deneyler gerçekleştirilmesi önerilmektedir.
- Gelecek çalışmalarda Marshall testlerine ilave olarak asfalt kaplamanın uzun süreli yükler altındaki reolojik performansının gözlemlenebilmesine yönelik ilave deneylerin yapılması önerilmektedir. Ayrıca BT (bilgisayarlı tomografi) görüntüleri veya ultrasonik ölçümler gibi teknikler de kullanılarak numunelerin boşluk oranı ve homojenlik açısından durumlarının da irdelenmesi önerilmektedir.

Fon Destek Beyanı

Bu çalışma Karabük Üniversitesi (KBU) Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) Koordinasyon Birimi KBÜBAP-23-YL-134 ve aynı zamanda TÜBİTAK 1002/B Acil Destek Modülü 223M421 nolu projeler ile desteklenmiştir.

Teşekkür

Çalışmada kullanılan bitüm ve agrega malzemeleri Karabük İl Özel İdaresi'nden ücretsiz olarak temin edilmiş olup özellikle Yol ve Ulaşım Hizmetleri Müdürlüğü'ne teşekkürlerimizi sunarız.

Etik Standartların Beyanı

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

Yazar Katkılarının Beyanı

Bu bölümde makalede adı geçen her bir araştırmacı, literatür araştırması, deney süreçleri, raporlama olmak üzere tüm süreçlerde yer almıştır.

Çıkar Çatışmasının Beyanı

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Kaynaklar

[1] EPA National overview: wastes and recycling. <u>https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials</u> (Erisim Tarihi: 02.05. 2024).

- [2] Eurostat waste statistics. <u>https://ec.europa.eu/</u> <u>eurostat/statistics-</u> <u>explained/index.php/Waste_statistics</u> (Erisim Tarihi 02.05.2024).
- [3] Statista global waste generation statistics & facts. <u>https://www.statista.com/topics/4983/waste-generation-worldwide/</u> (Erisim Tarihi 02.05.2024).
- [4] Van L, Hamid NA, Ahmad MF, Aizat AN, Ruslan R, Muhamad PF. Factors of single use plastic reduction behavioral intention. Emerging Science Journal 2021; 5(1): 269–278. https://doi.org/10.28991/esj-2021-01275.
- [5] European commission, directive 2008/98/EC of the european parliament and of the council. <u>http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:01:ES:HTML</u>. (Erisim Tarihi 07.09.2024).
- [6] Rominiyi OL, Adaramola BA, Ikumapayi OM, Oginni OT, Akinola SA. Potential utilization of sawdust in energy, manufacturing and agricultural industry; Waste to wealth. World Journal of Engineering and Technology 2017; 5(3): 526–539. https://doi.org/10.4236/wjet.2017.53045.
- [7] Mirski R, Dukarska D, Derkowski A, Czarnecki R, Dziurka D. By-products of sawmill industry as raw materials for manufacture of chip-sawdust boards. Journal of Building Engineering 2020;32(1). https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101460.
- [8] Nassef MM, Gabr AR, El-badawy SM. Laboratory evaluation of rice husk and sawdust on the performance of asphalt binders and mixtures. Mansoura Engineering Journal 2021;46.
- [9] Vishnu TB, Singh KL. A study on the suitability of solid waste materials in pavement construction: A review. International Journal of Pavement Research Technology 2021;14(1): 625–637. https://doi.org/10.1007/s42947-020-0273-z.
- [10] Kandhal PS. Waste materials in hot mix asphalt an overview. New York: ASTM; 1993.
- [11] Yasanthi RGN, Rengarasu TM, Bandara W. Study on the performance of waste materials in hot mix asphalt concrete, American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences 2016;23(1): 252–267.
- [12] Fayissa B, Gudina O, Yigezu B. Application of sawdust ash as filler material in asphaltic concrete production. Civil and Environmental Engineering Journal 2020;16(2):351–359. https://doi.org/10.2478/cee-2020-0035.
- [13] Osuya DO, Mohammed H. Evaluation of sawdust ash as a partial replacement for mineral filler in asphaltic concrete. African Journals Online 2017;19(2): 431–440.
- [14] Yasanthi RGN, Rengarasu TM, Jegatheesan N, Bandara W. Effects of temperature variation on hot mix asphalt concrete with saw dust ash used as aggregates. In: 5th h International Symposium on Advances in Civil and Environmental Engineering, Ruhuna, Japan; 2017.
- [15] Osinubi KJ, Edeh JE, Onoja WO. Sawdust ash stabilization of reclaimed asphalt pavement. Journal of ASTM International 2012;9(2): 454–467. https://doi.org/10.1520/stp154020120022.
- [16] Akter R, Hossain MK, Anwar MS, Rahman K. Performance evaluation of coal dust and wood powder ash as alternates of conventional filler in the asphalt concrete. Sustainable Engineering Innovation 2022;4(1): 82–96. https://doi.org/10.37868/sei.v4i1.id157.
- [17] Bao DX, Yu YY, Zhao QM. Evaluation of the chemical composition and rheological properties of bioasphalt from different biomass sources. Road Material and Pavement Design 2020;21(1): 1829–1843. https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1568287.
- [18] FAO, Forest Product Statistics. https://www.fao.org/forestry-fao/statistics/80938/en/ (Erişim Tarihi: 02.12.2024).
- [19] Bitümlü karışımlar-Sıcak asfalt karışımlar-Deney yöntemleri. Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 12697; 2009.



Adıyaman University Journal of Engineering Sciences Adyü J Eng Sci 2025;12(25):44-59

Research Article / Araştırma Makalesi

Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Adyü Müh Bil Derg 2025;12(25):44-59

https://doi.org/10.54365/adyumbd.1602399

Karar Ağacı Yaklaşımı ile Doğal ve Geri Dönüştürülmüş Beton Agreganın Mesafe Bazlı Maliyet ve Emisyon Optimizasyonu

Distance-Based Cost and Emission Optimization of Natural and Recycled Concrete Aggregates Using Decision Tree Approach

Merve Akbaş^{1*}, Recep İyisan¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Türkiye

Öz

Türkiye'nin yüksek deprem riski ve kentsel dönüşüm projeleri, geri dönüştürülmüş beton agrega (GDBA) kullanımını artırma potansiyeline sahiptir. Ancak taşıma maliyetleri ve emisyonlar, bu malzemenin kullanımını sınırlamaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'de vol dolgu projelerinde doğal agrega (DA) ve GDBA kullanımını etkileyen mesafe, maliyet ve emisyon faktörlerini karar ağacı yöntemiyle analiz edilmiştir. 0-100 km taşıma mesafesinde farklı senaryolar incelenmiş ve kısa mesafelerde (0-30 km) GDBA'nın çevresel avantajlarının öne çıktığı, uzun mesafelerde (70-100 km) ise DA'nın ekonomik üstünlük sağladığı belirlenmiştir. Modelin sınıflandırmasının yüksek doğruluk oranlarına sahip olduğu, ROC eğrisi ve AUC değeri (0.97) gibi metriklerle gösterilmiştir. Sonuçlar, vol dolgu projelerinde mesafe bazlı maliyet ve emisyon optimizasyonunda DA ve GDBA'nın sürdürülebilirlik açısından kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Bulgular, kaynak yerlerinin bölgesel dağılımına göre değişebileceğinden, daha gelecekte geniş sürdürülebilirlik kriterleriyle incelenmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Deprem atıkları, geri dönüştürülmüş agrega, makine öğrenmesi, sürdürülebilir inşaat

Abstract

Turkey's high seismic risk and extensive urban transformation projects present significant potential for the use of recycled concrete aggregate (RCA). However, transportation costs and emissions limit its widespread adoption. This study analyzes the factors of distance, cost, emissions influencing the use of natural aggregate (NA) and RCA in road embankment projects in Turkey through a decision tree methodology. Various scenarios within а transportation range of 0-100 km was examined, revealing that RCA offers environmental advantages at short distances (0-30 km), while NA demonstrates economic superiority at longer distances (70-100 km). The classification accuracy of the model has been demonstrated through metrics such as the ROC curve and AUC value (0.97), indicating its high performance. The findings underscore the critical role of NA and RCA in sustainability, particularly in optimizing cost and emissions based on transportation distance. Results may vary regionally; future studies should consider broader sustainability criteria.

Keywords: Earthquake debris, recycled aggregate, machine learning, sustainable construction

^{*} Sorumlu yazar e-posta (Corresponding e-mail): <u>akbasm@itu.edu.tr</u> Geliş Tarihi (Received):16.12.2024, Kabul Tarihi (Accepted): 26.02.2025

1. Giriş

Geri dönüştürülmüş beton agrega (GDBA), inşaat ve yıkım atıklarının geri dönüşümüyle elde edilen ve altyapı projelerinde doğal agregaların yerini alabilen alternatif malzemedir. Yıkım sonrası kırma ve eleme işlemlerinden geçirilerek yeniden kullanılabilir hale gelen bu malzemeler, çevresel ve ekonomik anlamda önemli avantajlar sunmakta; atık miktarını azaltarak, doğal agrega talebini sınırlayarak ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde düşürerek sürdürülebilir inşaat yaklaşımına katkı sağlamaktadır [1, 2] GDBA, çevresel ve ekonomik avantajları nedeniyle birçok ülkede dikkat çekmiş ve yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. GDBA'nın Avrupa'daki toplam agrega tüketimindeki oranı ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki uygulamaları dikkat çekmektedir [3]. Türkiye'de ise özellikle 6 Şubat 2023 depremleri sonrasında oluşan büyük miktardaki inşaat ve yıkım atıkları, geri dönüşüm süreçlerine kazandırılmadığı takdirde yalnızca depolama alanlarının dolmasına ve çevresel kirliliğe neden olmakla kalmayıp, aynı zamanda ekonomik bir değer yaratma fırsatını kullanamama riski taşımasına rağmen; GDBA kullanımının toplam agrega talebindeki payı hâlâ %5'in altında kalmaktadır [4]. Bu sınırlı kullanım, mesafeye bağlı artan taşıma maliyetleri, kalite standartlarını sağlama zorlukları ve geri dönüşüm farkındalığındaki eksiklikler gibi çeşitli nedenlere dayanmaktadır [5].

Türkiye'nin yüksek deprem riski ve yoğun kentsel dönüşüm projelerinin sağladığı potansiyel göz önüne alındığında, GDBA'nın özellikle yol dolguları gibi yüksek miktarda malzeme gerektiren uygulamalarda önemli bir alternatif olarak değerlendirilme imkânı sunduğu görülmektedir. Özellikle esneklik, dayanıklılık ve yüksek mukavemet gerektiren yol inşaatlarında temel ve alt temel tabakalarında kullanılan agrega seçimi, projelerin uzun vadeli dayanıklılığı, maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır [6]. Bununla birlikte, geleneksel olarak doğal agrega (DA), dayanıklılık ve stabilite sağlama özellikleri nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak, DA'nın taş ocaklarından çıkarılması, işlenmesi ve taşınması süreçleri, doğal kaynakların hızla tükenmesine ve ekosistem üzerinde olumsuz etkiler yaratmasına neden olmaktadır [7,8]. Bu bağlamda, GDBA'nın yol inşaatlarında çevre dostu ve ekonomik bir alternatif olarak kullanılması, Türkiye'nin sürdürülebilir inşaat hedeflerine ulaşabilmesi için büyük önem taşımaktadır. Türkiye'de GDBA elde edilme ve yol dolgu malzemesi olarak tekrar kullanıma kazandırma süreci Şekil 1'de detaylı bir şekilde verilmiştir. Ancak, taşıma mesafelerinin bu sürecteki etkisi göz önüne alındığında, GDBA'nın ekonomik ve çevresel faydalarının mesafe arttıkça azalma eğiliminde olduğu bilinmektedir. Bu durum, GDBA'nın taşıma mesafesi kısa olan projelerde hem çevresel hem de ekonomik açıdan tercih edilmesini sağlarken, daha uzun mesafelerde taşıma maliyetleri ve emisyonların artması nedeniyle verimliliğin düşme riskiyle karşı karşıya kalmasına neden olmaktadır [6,9].

Bu avantaj ve dezavantajlar doğrultusunda, Türkiye'de yapılan araştırmalar, GDBA'nın mühendislik özelliklerini incelemeye ve özellikle yol temel ile alt temel tabakalarında kullanılabilirliğini değerlendirmeye odaklanmıştır. Örneğin, Aytekin ve ark. [10] geri dönüştürülmüş malzemelerin mühendislik performansını doğal agregalarla karşılaştırarak, GDBA'nın belirli yol tabakalarında sürdürülebilir bir seçenek olabileceğini ortaya koymuştur. Akbas ve ark. [11], geri dönüştürülmüş beton agregaların donma-çözülme döngülerine karşı dayanıklılığını analiz etmiş ve bu malzemenin Türkiye'deki yol projelerinde kullanımına uygun olduğunu göstermiştir. Toka ve Olgun [6] ise GDBA'nın yol alt temeli olarak hem mekanik performans hem de ekonomik açıdan avantajlarını incelemiş ve özellikle kısa taşıma mesafelerinde maliyet etkin bir çözüm sunduğunu belirtmiştir. Bu çalışmalar, Türkiye'de GDBA'nın yol projelerinde mühendislik özelliklerini, ekonomik faydalarını ve çevresel sürdürülebilirlik açısından değerli bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak mevcut araştırmalar, daha detaylı analizler ve karar destek sistemleriyle güçlendirilmiş veri setlerinden yoksun olduğu için, GDBA'nın potansiyel kullanım alanlarında optimum çözümleri belirlemede yetersiz kalmaktadır. Bu durum, özellikle maliyet ve emisyon gibi çevresel ve ekonomik kriterlerin bir arada ele alınması gerektiğini ortaya koymakta ve bu alanda uzun vadeli sürdürülebilir hedeflere ulaşmak için kapsamlı planlamaları ve ileri düzey analizleri içeren bir yaklaşımın önemini vurgulamaktadır.



Şekil 1. Türkiye'de GDBA elde edilme ve tekrar kullanıma kazandırma süreci

GDBA'nın taşıma mesafeleriyle ilişkili ekonomik ve çevresel performansını değerlendirmek, farklı değişkenlerin bir arada ele alındığı kapsamlı analizleri gerektirmektedir. Bu tür karmaşık karar süreçlerinde, veri odaklı analiz yöntemleri önemli bir rol oynamaktadır. Karar ağacı modelleri, istatistiksel ve görselleştirme temelli bir analiz yöntemi olup, veri setlerini dallara ayırarak farklı koşullara bağlı sonuçları görselleştirebilme kapasitesine sahiptir. Bu modeller, taşıma mesafesi, maliyet ve çevresel etkiler gibi çok boyutlu değişkenleri anlamlı bir şekilde analiz ederek, GDBA'nın yol projelerinde hangi koşullarda daha avantajlı bir seçenek olduğunu belirlemek için etkili bir araç sunmaktadır [12]. Modellerin sınıflandırma başarısını değerlendirmek için sıkça kullanılan ROC (Alıcı İşletim Karakteristiği) ve AUC (Eğri Altındaki Alan) analizleri ise modelin doğru tahmin yapma kapasitesini ölçmek için önemli metriklerdir. ROC eğrisi, modelin doğru pozitif oranını yanlış pozitif oranına göre görselleştirirken, AUC değeri, ROC eğrisinin altında kalan alanı hesaplayarak modelin genel doğruluğunu ve performansını nicel bir şekilde ortaya koymaktadır [13,14]. Bu metodolojiler, maliyet ve emisyonlarının etkilerini daha somut bir şekilde ortaya koyarak, veri odaklı karar destek süreçlerine katkı sağlamaktadır [15].

Türkiye'de yol yapım projelerinde kullanılan malzemelerin çevresel ve ekonomik etkilerini değerlendirirken, sürdürülebilirlik ile maliyet etkinliği arasında bir denge kurmak giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu çalışma, Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) [16], kapsamında kullanım uygunluğu belirlenen DA ve GDBA malzemelerinin taşıma mesafesine bağlı çevresel ve ekonomik performanslarını analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada taşıma mesafesi, maliyet ve emisyon gibi kritik parametreler dikkate alınarak karar ağacı modeli kullanılmıştır. Her bir mesafe aralığında hangi malzemenin daha uygun olduğu GDBA'nın kısa mesafelerde çevresel ve ekonomik üstünlüğünü, uzun mesafelerde ise maliyet ve emisyon avantajlarını yitirme riski dikkate alınarak analiz edilmiştir. Modelin performansı ROC eğrisi ve AUC değeri gibi metriklerle doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, taşıma mesafesine bağlı olarak malzeme tercihlerinde karar vericilere rehberlik edecek somut karar sınırları ve alanları sunmuştur.

2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada, Akbas ve Iyisan [17] tarafından mühendislik özellikleri detaylı bir şekilde incelenerek Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) [16] kapsamında yol alt temel ve temel tabakalarında kullanım uygunluğu belirlenen doğal agrega (DA) ve geri dönüştürülmüş beton agrega (GDBA) malzemelerinin çevresel performansları taşıma mesafesi, maliyet ve emisyon parametreleri doğrultusunda, karar ağacı modeli kullanılarak analiz edilmiştir.

Analiz süreci Şekil 2'den de görülebileceği üzere taşıma mesafesinin belirlenmesiyle başlamış, ardından maliyet ve emisyon verilerinin hesaplanmasıyla devam etmiştir. Karar ağacı modeli oluşturularak malzeme tercihleri değerlendirilmiş ve modelin performansı, ROC (Alıcı İşletim Karakteristiği) ve AUC (Eğri Altındaki Alan) analizleriyle doğrulanmıştır. Sürecin sonunda, çevresel ve ekonomik faktörler doğrultusunda taşıma mesafesine bağlı olarak doğal veya geri dönüştürülmüş malzeme tercihleri yapılmıştır.



Şekil 2. Analiz sürecinin genel çerçevesi

2.1. Veri Toplama ve Ön İşleme

Bu çalışmada kullanılan veri seti, Türkiye'deki yol projelerinde DA ve GDBA malzemelerinin, üretim ve nakliye kaynaklı emisyonlarını belirlemek amacıyla oluşturulmuştur. Veri setinin oluşturulma sürecinde, uluslararası literatürde yer alan emisyon katsayıları ve Türkiye inşaat sektörüne ait yerel veriler sistematik bir yöntemle bir araya getirilmiştir. İlk olarak DA GDBA üretim ve nakliye süreçlerine ilişkin karbon emisyon katsayıları ve enerji tüketim değerleri uluslararası akademik çalışmalardan [18-22] elde edilmiştir. Ardından, Türkiye'de büyük ölçekli yol inşaat projelerinde faaliyet gösteren sektör temsilcileriyle gerçekleştirilen görüşmeler doğrultusunda DA ve GDBA'nın maliyet dinamikleri, lojistik süreçleri ve taşıma maliyetlerine ilişkin yerel veriler toplanmıştır. Son olarak, literatürden elde edilen küresel katsayıların saha verileriyle uyumluluğu değerlendirilmiş ve doğrulandıktan sonra, karar ağacı modelinde kullanılmıştır. Bu yöntem, doğal ve geri dönüştürülmüş malzemelere ilişkin ekonomik ve çevresel parametrelerin karşılaştırılabilirliğini artırarak, taşıma mesafesine bağlı maliyet-etkinlik analizinin çevresel sürdürülebilirlik çerçevesinde gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Taşıma mesafesi, maliyet ve emisyon parametrelerini dikkate alarak, 0-100 km mesafe aralıklarında hangi malzemenin ekonomik ve çevresel açıdan daha uygun olduğunu belirlemek için karar ağacı analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz için DA ve GDBA'nın 0-100 km arasındaki mesafe kombinasyonlarını içeren, toplamda 10.000 senaryoyu kapsayan veri seti oluşturularak maliyet ve emisyon yüklerinin kapsamlı bir şekilde karşılaştırılması hedeflenmiştir. Taşıma maliyeti (TL) ve emisyon yükü (kg CO₂) gibi farklı ölçeklerdeki parametrelerin doğru bir şekilde karşılaştırılabilmesi için veri normalizasyonu uygulanmıştır. Normalizasyon işlemi, her bir parametrenin minimum ve maksimum değerleri kullanılarak yeniden ölçeklendirilmiş ve böylece farklı büyüklükteki değişkenlerin karar ağacı ile analiz sürecinde eşit ağırlıkla değerlendirilmesi sağlanmıştır.

Karar ağacı analizi için kullanılan verilerden biri, DA'nın üretim emisyonlarıdır. DA için üretim emisyonları 804 kg CO₂/ton olarak belirlenmiştir. Bu değer, Sabău ve Bompa [18] tarafından doğal agregaların karbon ayak izi üzerine yapılan kapsamlı bir analizle doğrulanmıştır. Çalışmada bu yüksek emisyonun, doğal kaynakların çıkarımı sırasında yoğun enerji tüketimi ve ilgili lojistik süreçlerden kaynaklandığı vurgulanmıştır. GDBA için ise üretim emisyonu 536 kg CO₂/ton olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Pradhan ve ark. [19] tarafından geri dönüşüm süreçlerinin çevresel etkilerini detaylı olarak inceleyen çalışmada sunulan değerlerle uyumludur. Bu durum, GDBA'nın yeniden işlenmesinin DA çıkarımına kıyasla daha düşük enerji ve kaynak tüketimi gerektirdiğini göstermektedir [20].

Nakliye süreçleri sırasında oluşan karbon emisyonlarının hesaplanmasında, Tang ve ark. [21] tarafından önerilen, Avrupa ve Asya taşımacılık sistemlerindeki karbon salınımı standartlarıyla tutarlı olan taşıma mesafesine bağlı katsayı kullanılmıştır. Bu katsayı, her bir ton malzeme için kilometre başına 0.804 kg CO₂ olarak belirlenmiştir. Böylece, taşıma kaynaklı emisyonlar, toplam taşıma mesafesi ve taşınan malzeme miktarına bağlı olarak hesaplanmış ve üretim emisyon miktarına eklenerek toplam emisyon değeri belirlenmiştir. Bu veriler doğrultusunda, her iki malzemenin 0-100 km arası taşıma mesafesinde toplam karbon emisyonlarının dağılımı Şekil 3'te sunulmuştur. Şekildeki kutu grafikler, her malzeme türü için belirlenen mesafe aralığında üretim ve nakliyeden kaynaklı toplam karbon emisyonlarının medyanını, çeyrekler aralığını ve en düşük/en yüksek değerlerini temsil etmektedir. DA için toplam karbon emisyonlarının medyan değerinin yaklaşık 840 kg CO_2 olduğu, GDBA için ise bu değerin 580 kg CO_2 civarında gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 3. DA ve GDBA malzemelerinin taşıma mesafelerine bağlı olarak toplam emisyon değerleri

Maliyet analizi kapsamında hem DA hem de GDBA için taşıma maliyetleri ve satın alma maliyetleri eşit olarak değerlendirilmiştir. Bu eşitlik, sektörde büyük hacimli malzeme alımları gerçekleştiren uygulayıcılarla yapılan görüşmeler sonucunda belirlenmiştir. Özellikle yol dolgusu gibi projelerde, yüksek miktarda alım yapıldığında GDBA'nın birim maliyetinin DA ile aynı seviyeye geldiği ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra, taşıma maliyetlerinin de her iki malzeme için benzer olduğu kabul edilmiştir. Maliyet (satın alma ve nakliye) ve taşıma mesafesi için toplam ağırlık %70 (her biri için %35) olarak, emisyon için ise %30 ağırlık atanmıştır. Bu oranlar, sürdürülebilirlik odaklı projelerde ekonomik ve çevresel hedefler arasındaki dengeyi temsil etmektedir. Ağırlıklandırma değerleri, Türkiye bağlamındaki sürdürülebilir inşaat projelerine yönelik hedefler ve Marinković ve ark. [22] ile Tang ve ark. [21] gibi literatürdeki benzer çalışmalarda kullanılan yaklaşımlar temel alınarak belirlenmiştir.

2.2. Karar Ağacı Modeli, Modelin Derinlik Optimizasyonu ve Karışıklık Matrisi Analizi

Karar ağacı yöntemi, bir veri kümesindeki bağımsız değişkenler ile bir hedef değişken arasındaki ilişkileri görselleştirmek ve analiz etmek için kullanılan bir makine öğrenimi ve veri madenciliği tekniğidir. Bu yöntem, karar problemlerini çözmek için verileri dallara ayırarak farklı koşullar altında elde edilen sonuçları açık ve kolay anlaşılır bir şekilde sunar. Her bir dal, bir karar kuralını veya koşulu temsil ederken, yaprak düğümleri son kararları veya sınıfları ifade eder. Bu nedenle çalışmada karar ağacı modelinin oluşturulma sürecinde DA ve GDBA'nın 0-100 km arasındaki mesafe kombinasyonlarını içeren, toplamda 10.000 senaryoyu kapsayan veri seti, her iki malzemenin ekonomik ve çevresel avantajlarının detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımıştır. Modelin eğitim sürecinde, taşıma emisyon ve nakliye mesafesi parametreleri, önem katsayıları dikkate maliveti, alınarak değerlendirilmiştir. Modelin sonuçlarını ifade eden ve malzeme seçimini belirleyen bir değişken olan hedef değişken DA ve GDBA arasında seçim yapmak üzere kodlanmıştır. Model, malzeme tercihini ikili sınıflandırma biçiminde gerçekleştirmiştir; 0 değeri DA'yı, 1 değeri ise GDBA'yı temsil etmektedir. Python programlama dilinde veri bilimi için yaygın olarak kullanılan Scikit-learn kütüphanesi ile geliştirilen karar ağacı modelinin performansını artırmak amacıyla, Scikit-learn'ün sunduğu hiperparametre optimizasyon araçlarından olan ve belirli hiperparametreler için önceden tanımlanmış bir değer kümesi üzerinden sistematik bir arama gerçekleştirip her kombinasyonu deneyerek en iyi performans gösteren parametreleri seçen grid search yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda, en uygun derinlik seviyesi, bölünme kriteri ve minimum yaprak düğüm boyutu gibi hiperparametreler optimize edilmiştir. Optimize edilen bu parametreler, modelin sınıflandırma doğruluğunu ve genelleme kapasitesini artırmayı hedeflemistir.

Derinlik seviyesi, karar ağacının dallanma miktarını belirleyen önemli bir parametredir. Daha yüksek bir derinlik, modelin veriyi daha ayrıntılı öğrenmesini sağlarken, aşırı öğrenme riskini artırabilir. Bu nedenle, modelin sınıflandırma doğruluğunu korurken genelleme kapasitesini optimize etmek için uygun bir derinlik seviyesi seçilmiştir. Seçilen derinlik seviyesi ve maksimum derinlikteki modelin doğruluk oranları, doğru ve yanlış tahminlerini ayrıntılı bir şekilde görselleştiren karışıklık matrisi analizleri ile değerlendirilmiştir. Seçilen derinlik seviyesi için sonuçlar Python programlama dilinde Scikit-learn kütüphanesinde yer alan plot_tree fonksiyonu ile görselleştirilmiştir.

Karışıklık matrisi ise dört temel bileşenden oluşmaktadır. Doğru Pozitif (True Positive, TP), modelin pozitif bir sınıfı doğru bir şekilde tahmin ettiği durumları ifade ederken; Yanlış Pozitif (False Positive, FP), modelin negatif bir sınıfı pozitif olarak yanlış sınıflandırdığı durumları temsil etmektedir. Benzer şekilde, Doğru Negatif (True Negative, TN), modelin negatif bir sınıfı doğru bir şekilde sınıflandırmasını, Yanlış Negatif (False Negative, FN) ise modelin pozitif bir sınıfı yanlış bir şekilde negatif olarak sınıflandırmasını ifade etmektedir. Bu çalışmada, karışıklık matrisindeki TN, modelin DA sınıfını doğru bir şekilde tahmin ettiği durumları ifade etmektedir. Örneğin, gerçek malzeme tercihi DA iken, modelin bu tercihi doğru bir şekilde DA olarak tahmin etmesi bir TN durumu olarak değerlendirilmektedir. FN ise, gerçek sınıf GDBA iken modelin bu sınıfı yanlış bir şekilde DA olarak sınıflandırması anlamına gelmektedir. Benzer şekilde, TP modelin gerçek sınıf GDBA olan bir durumu doğru bir şekilde GDBA olarak sınıflandırdığı durumları temsil ederken; FP ise, gerçek sınıf DA iken modelin bu sınıfı yanlış bir şekilde GDBA olarak tahmin ettiği durumları ifade etmektedir.

2.3. Model Performansının ROC Eğrisi ve AUC Değerine Göre Analizi

Bu çalışmada, karar ağacı modelinin sınıflandırma başarısını kapsamlı bir şekilde değerlendirmek amacıyla Alıcı İşletim Karakteristiği (ROC) eğrisi, Eğri Altındaki Alan (AUC), Doğru Pozitif Oranı (TPR) ve Yanlış Pozitif Oranı (FPR) metrikleri tercih edilmiştir. ROC eğrisi, modelin farklı eşik değerlerinde nasıl bir performans sergilediğini analiz etmeye olanak tanıyan önemli bir görselleştirme aracı olup; karar ağacı gibi ikili sınıflandırma modellerinde, modelin pozitif ve negatif sınıfları ne kadar iyi ayırt edebildiğini değerlendirmek açısından kritik bir rol oynamaktadır. ROC eğrisinin altında kalan alanı temsil eden AUC metriği ise, modelin genel performansını özetleyen tek bir değer sunduğundan, sınıflandırma başarısını nicel olarak ifade etmek ve modelleri karşılaştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. AUC değeri 0 ile 1 arasında değişmekte olup, 1'e yakın bir değer modelin mükemmel bir sınıflandırma performansı sergilediğini, 0.5'e yakın bir değer ise modelin rastgele tahmin ettiğini ifade etmektedir. ROC eğrisi ve AUC değeri farklı eşik değerlerinde modelin performansını kapsamlı bir şekilde değerlendirme imkânı sunduğundan dolayı bu çalışmada karar ağacı modelinin sınıflandırma başarısını analiz etmek için tercih edilmiştir. Modelin doğru pozitif sınıfları yakalama kapasitesini ölçmek için TPR metriği kullanılmıştır. Özellikle, GDBA'nın doğru bir şekilde sınıflandırılması çevresel ve ekonomik analiz açısından büyük önem taşıdığından, TPR'nin yüksekliği model başarısını doğrudan etkileyen bir faktör olarak değerlendirilmiştir. Öte yandan, modelin negatif sınıfları yanlış pozitif olarak tahmin etme eğilimini belirlemek için FPR metriği hesaplanmıştır. FPR'nin düşük olması, modelin yanlış pozitif tahmin oranının az olduğunu ve karar destek süreçlerinde güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Genel doğruluk metriği, model başarısını ölçmek için temel bir kriter olsa da dengesiz veri setlerinde yanıltıcı olabileceğinden, tek başına değerlendirilmesi yeterli bulunmamıştır. Bu nedenle, ROC eğrisi ve AUC metriği gibi sınıflandırma eşiklerinden bağımsız metrikler tercih edilerek, modelin yalnızca genel doğruluğu değil, aynı zamanda karar verme sürecinde farklı sınıfları ne kadar iyi ayırt edebildiği analiz edilmiştir. TPR ve FPR'nin kullanımı ise modelin hangi durumlarda doğru ve yanlış tahminler yaptığını daha detaylı anlamayı sağlamış, böylece modelin güvenilirliğini artırmıştır. Bu doğrultuda, çalışmada ROC eğrisi, AUC, TPR ve FPR metriklerinin birlikte kullanımı, modelin sınıflandırma performansının kapsamlı ve güvenilir bir şekilde değerlendirilmesini sağlamıştır.

Modelin ROC eğrisi, Python programlama dili ve Scikit-learn kütüphanesi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu süreçte, modelin tahmin ettiği olasılık değerleri ile gerçek sınıflar karşılaştırılmış ve farklı eşik değerlerine göre TPR ve FPR değerleri sırasıyla Denklem 1 ve 2'ye göre hesaplanmıştır.

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \tag{1}$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \tag{2}$$

Burada, TP (True Positive) doğru pozitif tahmin sayısını, FN (False Negative) ise modelin yanlış negatif sınıflandırmalarını ifade ederken; FP (False Positive) yanlış pozitif tahmin sayısını, TN (True Negative) ise doğru negatif sınıfları ifade etmektedir. TPR'nin yüksek olması, modelin hedef sınıfları doğru bir şekilde yakaladığını, FPR'nin düşük olması ise modelin yanlış pozitif tahmin oranının düşük olduğunu göstermektedir. Hesaplanan TPR ve FPR değerleri, ROC eğrisi üzerindeki noktaları oluşturmuştur. Bu noktaların görselleştirilmesiyle elde edilen eğrinin altında kalan alan, trapez entegrasyonu yöntemiyle hesaplanarak AUC değeri Denklem 3 ile bulunmuştur.

$$AUC = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} \cdot (y_i + y_{i+1}) \cdot (x_i + x_{i+1})$$
(3)

Burada, y_i ve y_{i+1} bu noktalara karşılık gelen TPR değerlerini ifade ederken; x_i ve x_{i+1} ise ardışık FPR değerlerini ifade etmektedir.

2.4. Karar Sınırı ve Karar Alanları

Karar sınırları, modelin belirlediği taşıma mesafesi faktörüne bağlı olarak DA ve GDBA arasında tercih yapılmasını sağlayan ayrım çizgilerini ifade etmektedir. Bu sınırlar, taşıma mesafesi kriterine göre malzemelerin çevresel ve ekonomik uygunluklarını görselleştirerek karar vericilere rehberlik etmektedir. Bu nedenle DA ve GDBA tercihlerini belirleyen karar sınırlarını görselleştirmek ve farklı taşıma mesafelerinde malzeme seçimi ile ilgili karar alanlarını netleştirmek amacıyla, karar ağacı modelinin çıktıları analiz edilmiş ve karar alanları 0-100 km mesafe aralığındaki tüm kombinasyonlarda DA veya GDBA'nın tercih edildiği bölgeleri açıkça gösterecek şekilde ayrılmıştır.

Karar sınırlarının görselleştirilmesi için Python programlama dilindeki Matplotlib ve Seaborn kütüphanelerinden yararlanılarak iki boyutlu grafik oluşturulmuştur. Bu grafik, taşıma mesafesi ile malzeme tercihleri arasındaki ilişkiyi görselleştirerek karar süreçlerini sadeleştirmeyi ve somutlaştırmayı amaçlamaktadır. Grafiklerin taşıma mesafesi ve malzeme tercihini göstermesinin nedeni, Türkiye'de GDBA kullanımının önündeki temel engellerden biri olan taşıma mesafesi kaynaklı maliyet ve emisyon yüklerini karar vericilere net bir şekilde sunma ihtiyacı ve bu bağlamda, taşıma mesafesi değiştiğinde hangi malzemenin çevresel ve ekonomik açıdan daha uygun olduğunu belirtmektir.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde, çalışmanın sonuçları kapsamlı bir şekilde ele alınmış ve kullanılan karar ağacı modelinin performansı detaylı olarak incelenmiştir. İlk olarak, modelin farklı derinlik seviyelerinde sınıflandırma başarısı ve genelleme kapasitesi değerlendirilmiş, optimum derinlik seviyesi belirlenmiştir. Daha sonra, modelin DA ve GDBA sınıflarını doğru tahmin etme kapasitesi karışıklık matrisi analizleriyle incelenmiş ve sınıflandırma performansı ROC eğrisi ve AUC değeriyle değerlendirilmiştir. Karar ağacı görselleştirmesi, taşıma mesafesi değişkeninin malzeme tercihleri üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymuş, karar sınırları ve alanlarının görselleştirilmesiyle farklı mesafe aralıklarında sürdürülebilir malzeme seçimleri için içgörüler sunulmuştur. Son olarak, elde edilen bulgular literatürdeki ilgili çalışmalarla karşılaştırılarak tartışılmış ve modelin agrega seçimi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

3.1. Derinlik ve Karışıklık Matrisine Göre Model Performansı

Karar ağacı modelinin performansını değerlendirmek ve optimum derinliği belirlemek için model doğruluğu farklı derinlik seviyelerinde analiz edilmiştir. Daha yüksek bir derinlik, modelin daha fazla parametreyi dikkate alarak daha ayrıntılı tahminler yapmasını sağlar; ancak bu durum aynı zamanda aşırı öğrenme riskini de beraberinde getirebilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada farklı derinlik seviyelerindeki model doğrulukları eğitim ve test veri setleri üzerinde elde edilen sınıflandırma sonuçlarına dayalı olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4, modelin farklı derinlik seviyelerinde sınıflandırma doğruluğunu göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere, derinlik seviyesi arttıkça model doğruluğunun önemli ölçüde yükselmiş, ancak 9. derinlikten sonra doygunluğa ulaşmıştır. Model doğruluğu, düşük derinlik seviyelerinde (%75-85 aralığında) sınırlı bir performans gösterirken, 4. derinlikten itibaren doğruluk oranı %95 seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, modelin daha fazla karar noktası ile sınıflandırma başarısını artırdığını gösterirken; derinlik 9'dan sonra doğruluğun sabitlenmesi, eklenen karar noktalarının sınıflandırma başarısına anlamlı bir katkı sağlamadığını ortaya koymuştur. Ayrıca, 4 ile 9 arasındaki derinlik seviyelerinde doğruluk oranındaki artış, sınıflandırma performansını iyileştirse de eklenen karar noktalarının neden olduğu artan karmaşıklığın modelin genelleme yeteneğini sınırlayabileceği ve aşırı öğrenme riskini artırabileceği göz önünde bulundurularak, bu durum karışıklık matrisi analizleri ile de kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Derinliğe göre karar ağacı doğruluğunun değişimi

Karar ağacı modelinin sınıflandırma başarısını daha ayrıntılı bir şekilde anlamak ve farklı derinliklerdeki doğruluk ve hata oranlarını karşılaştırmak için karışıklık matrisi analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5a ve Şekil 5b, modelin sırasıyla 9. ve 4. derinlik seviyelerinde DA ve GDBA sınıflarını doğru ve yanlış tahmin ettiği durumları görselleştirmektedir. Matrisin yatay ekseni tahmin edilen sınıfları, dikey ekseni ise gerçek sınıfları göstermektedir. Her hücrede yer alan değerler, modelin ilgili sınıflar için doğru veya yanlış sınıflandırma durumlarını ifade etmektedir.



Şekil 5. Karar ağacı derinliğinin 4 ve 9 olması durumunda karışıklık matrisler

Şekil 5a'dan da görüleceği üzere, 9. derinlik seviyesinde model DA sınıfında 1475 doğru ve 15 yanlış tahmin yaparken, GDBA sınıfında 1551 doğru ve 20 yanlış tahminde bulunmuştur. Bu sonuçlar, derinlik arttıkça modelin sınıflandırma başarısının daha hassas hale geldiğini göstermektedir. Ancak, aşırı öğrenme riski nedeniyle bu derinlik seviyesinde modelin genelleştirme yeteneği sınırlı olabilmektedir. Şekil 5b'den ise, 4. derinlik seviyesinde modelin DA sınıfında 1438 doğru ve 52 yanlış tahmin yaparken, GDBA sınıfında 1461 doğru ve 110 yanlış tahminde bulunduğu görülmektedir. Daha düşük derinlik seviyesinde sınıflandırma doğruluğu bir miktar düşse de modelin genelleştirme kapasitesinin artması ve aşırı öğrenme riskinin azalması bu derinlik seviyesini daha uygun hale getirmiştir. Bu doğrultuda karar ağacı görselleştirmesi için derinlik 4 olarak seçilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, modelin doğruluk oranı derinlik arttıkça yükselmiş, ancak 9. seviyeden sonra doygunluğa ulaşmıştır. Bu noktadan sonra, eklenen karar noktalarının sınıflandırma başarısına anlamlı bir katkı sağlamadığı ve test veri seti üzerindeki doğruluk oranını belirgin şekilde artırmadığı görülmüştür. Karışıklık matrisleri incelendiğinde, daha yüksek derinlik seviyelerinde modelin eğitim verisi üzerinde yüksek doğruluk sağlarken, test verisi üzerinde daha düşük doğruluk oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, modelin aşırı öğrenmeye yatkın hale geldiğini ve yeni verilere genelleme yapma yeteneğinin azaldığını göstermektedir. Modelin doğruluk ve genelleme dengesini sağlamak amacıyla, aşırı öğrenmeyi minimize edecek ve modelin açıklanabilirliğini koruyacak bir derinlik seviyesi belirlenmesi amaçlanmıştır. 4 ile 9. derinlik seviyeleri arasında modelin doğruluk oranı artmasına rağmen, hata oranlarında belirgin bir azalma sağlanmamıştır. Bu nedenle, gereksiz karar noktalarının eklenmesini önlemek, modelin açıklanabilirliğini artırmak ve genelleme yeteneğini korumak amacıyla optimum derinlik seviyesi 4 olarak belirlenmiş ve karar ağacı bu derinlik seviyesinde görselleştirilmiştir.

3.2. Karar Ağacı Görselleştirmesi ve Analizi

0-100 km taşıma mesafesi aralığında DA ve GDBA malzeme tercihlerinin analiz edilmesi için oluşturulan karar ağacı modelinin görselleştirilmiş hali Şekil 6'da verilmiştir. Bu karar mekanizmalarını daha detaylı anlamak ve düğümlerdeki kararların hangi metriklere dayandığını açıklamak amacıyla ise Çizelge 1 hazırlanmıştır.

Şekil 6'dan da görüleceği üzere, karar ağacında yer alan her düğüm, modelin karar verme sürecini detaylı bir şekilde açıklayan bilgiler içermektedir. Her düğümün üst kısmında yer alan koşul, karar sürecinde kullanılan bir eşik değeri belirtmektedir. Karar ağacındaki yeşil ve kırmızı oklar ise modelin hangi koşulları sağladığını ve karar dallarının hangi yönde ilerlediğini görselleştirmektedir. Yeşil oklar "koşul doğru" durumlarını ifade ederken, kırmızı oklar "koşul yanlış" durumlarını temsil etmektedir. Örneğin, kök düğümde "DA Mesafe ≤ 49.5 km" koşulu yer almaktadır. Eğer bu koşul sağlanıyorsa yeşil ok takip edilerek sol dala ilerlenir ve 'DA Mesafe \leq 18.5 km' koşulu kontrol edilir. Kök bölgesinde DA Mesafe \leq 49.5 km koşulu sağlanmıyorsa (örneğin mesafe 50 km'nin üzerindeyse), kırmızı ok takip edilir ve model sağ dala yönelerek başka bir karar kriteri (GDBA \leq 69.5 km) değerlendirilir. Bu süreç, alt dallarda da benzer bir şekilde devam eder ve nihai yaprak düğümlerde hangi malzemenin tercih edilmesi gerektiğine dair sonuçlar sunulur.



Şekil 6. Karar ağacı modeli

Çizelge karar ağacındaki ara düğümleri ve bunlara bağlı karar noktalarını içermekte ve her bir karar yolunun sonucunu, bu sonuçlara bağlı malzeme tercihlerinin detaylarını içermektedir. Çizelgede karar ağacının düğümleri soldan sağa doğru numaralandırarak düzenlenmiş ve numaralandırmada kök düğümden başlayarak her bir dalın sol ve sağ dallarını takip eden bir sıra kullanılmıştır. Örneğin, kök düğüm altında yer alan, ilk sol dal "Düğüm 1.1", ilk sağ dal ise "Düğüm 1.2" olarak numaralandırılmıştır. Benzer şekilde, alt dallar da bir önceki düğümün sol veya sağ dallarını ifade edecek şekilde sırayla "Düğüm 2.1", "Düğüm 2.2" gibi numaralandırılmıştır. Bu düzen, okuyucunun hem çizelgeyi hem de Şekil 6'da sunulan karar ağacını kolaylıkla takip etmesine olanak sağlamaktadır.

Çizelgede şart sütunu, modelin karar verme sürecinde kullanılan eşik değerlerini belirtmekte ve hangi durumlarda hangi malzemenin tercih edileceğine dair ayrıntılar sunmaktadır. Örneğin, "DA Mesafe \leq 49.5" ifadesi, taşıma mesafesi 49.5 km'den az olduğunda kararın sol dala ilerlediğini, aksi durumda sağ dala yönlendiğini açıklamaktadır. 0 ile 0.5 arasında değer alan gini indeksi ise her düğümdeki sınıfların homojenliğini ölçmekte ve o düğümdeki karışıklık seviyesini göstermektedir. Daha düşük bir Gini değeri, o düğümde sınıfların daha net ayrıldığını, yani modelin daha kesin bir tahmin yaptığını gösterirken, yüksek bir Gini değeri karışıklığın daha fazla olduğunu ifade etmektedir. Numune sayısı, her düğümde değerlendirilen toplam örnek sayısını temsil etmektedir. Değer sütunu ise, bu örneklerin sınıflar bazındaki dağılımını açıklamaktadır. Örneğin bir düğümdeki "Değer = [4949, 5051]" ifadesi, 4949 örneğin DA 5051 örneğin ise GDBA olarak sınıflandırıldığını belirtmektedir. Son olarak, sınıf sütunu her düğümde çoğunlukta olan sınıfı ve bu sınıf modelin tahmin ettiği sonucu vermektedir.

Düğüm	Şart	Gini	Numune Sayısı	Değer	Sınıf
Kök	DA Mesafe \leq 49.5 km	0.500	10201	[4949, 5051]	GDBA
Düğüm 1.1	GDBA Mesafe ≤ 32.5 km	0.363	5151	[1225, 3926]	GDBA
Düğüm 1.2	GDBA Mesafe ≤ 69.5 km	0.387	5050	[3725, 1325]	DA
Düğüm 2.1	DA Mesafe ≤ 18.5 km	0.42	1650	[496, 1154]	GDBA
Düğüm 2.2	GDBA Mesafe ≤ 44.5 km	0.096	3400	[3229, 171]	DA
Düğüm 2.3	GDBA Mesafe ≤ 57.5 km	0.091	3570	[171, 3399]	DA
Düğüm 2.4	DA Mesafe ≤ 80.5 km	0.444	1581	[1054, 527]	DA
Düğüm 3.1	GDBA Mesafe ≤ 12.5 km	0.444	627	[418, 209]	DA
Düğüm 3.2	GDBA Mesafe ≤ 24.5 km	0.141	1023	[78, 945]	GDBA
Düğüm 3.3	DA Mesafe ≤ 36.5 km	0.375	600	[450, 150]	DA
Düğüm 3.4	GDBA Mesafe ≤ 48.5 km	0.015	2800	[2779, 21]	DA
Düğüm 3.5	GDBA Mesafe ≤ 53.5 km	0.014	2958	[21, 2937]	GDBA
Düğüm 3.6	DA Mesafe ≤ 62.5 km	0.370	612	[150, 462]	GDBA
Düğüm 3.7	GDBA Mesafe ≤ 77.5 km	0.149	961	[883, 78]	DA
Düğüm 3.8	GDBA Mesafe ≤ 88.5 km	0.399	620	[171, 449]	GDBA
Düğüm 4.1	Düğüm 3.1'den gelen şart sağlanıyorsa	0.392	247	[66, 181]	GDBA
Düğüm 4.2	Düğüm 3.1'den gelen şart sağlanmıyorsa	0.137	380	[352, 28]	DA
Düğüm 4.3	Düğüm 3.2'den gelen şart sağlanıyorsa	0.025	775	[10, 765]	GDBA
Düğüm 4.4	Düğüm 3.2'den gelen şart sağlanmıyorsa	0.398	248	[68, 180]	GDBA
Düğüm 4.5	Düğüm 3.3'ten gelen şart sağlanıyorsa	0.065	444	[429, 15]	DA
Düğüm 4.6	Düğüm 3.3'ten gelen şart sağlanmıyorsa	0.233	156	[21, 135]	GDBA
Düğüm 4.7	Düğüm 3.4'ten gelen şart sağlanıyorsa	0.164	200	[182, 18]	DA
Düğüm 4.8	Düğüm 3.4'ten gelen şart sağlanmıyorsa	0.002	2600	[2597, 3]	DA
Düğüm 4.9	Düğüm 3.5'ten gelen şart sağlanıyorsa	0.002	2754	[3, 2751]	GDBA
Düğüm 4.10	Düğüm 3.5'ten gelen şart sağlanmıyorsa	0.161	204	[18, 186]	GDBA
Düğüm 4.11	Düğüm 3.6'dan gelen şart sağlanıyorsa	0.233	156	[135, 21]	DA
Düğüm 4.12	Düğüm 3.6'dan gelen şart sağlanmıyorsa	0.064	456	[15, 441]	GDBA
Düğüm 4.13	Düğüm 3.7'den gelen şart sağlanıyorsa	0.398	248	[180, 68]	DA
Düğüm 4.14	Düğüm 3.7'den gelen şart sağlanmıyorsa	0.028	713	[703, 10]	DA
Düğüm 4.15	Düğüm 3.8'den gelen şart sağlanıyorsa	0.104	380	[21, 359]	GDBA
Düğüm 4.16	Düğüm 3.8'den gelen şart sağlanmıyorsa	0.469	240	[150, 90]	DA

Çizelge 1. Karar ağacı düğüm metrikleri

3.3. Model Performansının ROC Eğrisi ve AUC Değerine Göre Analizi

Modelin doğruluk ve güvenilirlik performansını değerlendirmek için ROC (Alıcı İşletim Karakteristiği) eğrisi ve AUC (Eğri Altındaki Alan) değerleri analiz edilmiştir. Şekil 7'de ROC eğrisi ve doğrusal referans çizgi görselleştirilmiştir. ROC eğrisi, modelin farklı eşik değerlerinde doğru pozitif oranı (True Positive Rate, TPR) ile yanlış pozitif oranı (False Positive Rate, FPR) arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Eğrinin sola doğru keskin bir yükseliş göstermesi, modelin yüksek bir doğru pozitif oranını düşük bir yanlış pozitif oranı ile birleştirdiğini ifade etmektedir. Örneğin, eğri üzerinde FPR değeri 0.2'ye denk geldiğinde, TPR değerinin 0.9'un üzerinde olması, modelin güçlü bir sınıflandırma yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir.



AUC değeri ise modelin genel sınıflandırma başarısını özetlemektedir. Şekilde görüldüğü üzere, modelin ROC eğrisi doğrusal referans çizgiden (rastgele sınıflandırmayı temsil eden mavi kesikli çizgi) belirgin şekilde ayrılarak yukarı ve sola yakın bir konumda yer almaktadır. Bu durum, modelin rastgele tahminlerden üstün olduğunu ve sınıflar arasında yüksek doğrulukla ayrım yapabildiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada modelin genel sınıflandırma performansını bir metrikle ifade edilen AUC değeri 0.97 olarak hesaplanmıştır. Bu yüksek AUC değeri, modelin hem DA hem de GDBA sınıflarını ayırt etme konusundaki yüksek performansını ve güvenilirliğini göstermektedir. Özellikle, ROC eğrisinin doğrusal referans çizgiden ne kadar uzak olduğu, modelin sınıflandırma yeteneğini somut bir şekilde ortaya koymakta ve karar destek süreçlerinde güvenilir bir temel oluşturduğunu göstermektedir.

3.4. Karar Sınırları ve Karar Alanlarının Görselleştirilmesi

Karar ağacı modelinin taşıma mesafelerine bağlı olarak DA ve GDBA tercihlerini görselleştiren karar sınırı grafiği analiz edilmiş ve Şekil 8'de sunulmuştur. Grafik, karar ağacı modelinin hangi mesafelerde hangi malzemeyi tercih ettiğini görselleştirerek, karar mekanizmalarının daha anlaşılır bir şekilde yorumlanmasına olanak tanımıştır. Karar sınırı grafiği, x ekseninde DA mesafesini, y ekseninde ise GDBA mesafesini temsil etmektedir. Turuncu bölge GDBA malzemesinin tercih edildiği alanları; mavi bölge ise DA malzemesinin tercih edildiği alanları göstermektedir. Grafikte yer alan sınır çizgisi DA ve GDBA arasında kararın değiştiği mesafeleri temsil etmekte ve modelin malzeme tercihi sürecinde kullandığı karar mekanizmalarını yansıtmaktadır. Karar sınırını temsil eden sınır Denklem 4 ile ifade edilmiştir.

$$y(km) = 0.80 x(km) + 10.39 km$$
(4)

Burada denklem, GDBA mesafesi (x) ve DA mesafesi (y) arasındaki ilişkiyi yaklaşık olarak modellemektedir. Örneğin, GDBA mesafesi 40 km olarak alındığında, bu denkleme göre y=0.80×40+10.39=42.4 sonucu elde edilmektedir. Bu durumda DA mesafesi 42.4 km'den büyükse GDBA malzemesi, aksi takdirde DA malzemesi tercih edilmelidir. Bu matematiksel model, grafikte görselleştirilen karar sınırını sayısal bir bağlama oturtarak, farklı senaryolarda hızlı ve etkin karar alınmasını kolaylaştırmaktadır.



3.5. Tartışma

Bu çalışmada kullanılan karar ağacı modeli DA ve GDBA tercihlerinin optimizasyonu için oldukça etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Hem mesafe, maliyet ve emisyon verilerini bir arada değerlendirerek ROC eğrisi ve AUC gibi model doğruluğunu ölçen metrikler ile modelin performansını analiz eden bir karar mekanizması oluşturulmuştur. Bu bölümde, karar ağacı modelinin geçerliliği, karar sınırlarının analizi ve özelliklerin yorumlanması daha ayrıntılı bir şekilde tartışılmıştır.

Literatürde karar ağacı modellerinin, özellikle karmaşık değişkenlerin bir arada değerlendirildiği durumlarda, güçlü bir sınıflandırma yöntemi sunduğu defalarca vurgulanmıştır. Örneğin, Mistikoglu ve ark. [23], karar ağacı yönteminin inşaat projelerinde kullanıldığını ve bu yöntemin, çoklu değişkenlerin etkisini anlamada oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, Lin ve ark. [24], inşaat projelerinin analizinde karar ağaçlarının sağladığı ayrıntılı içgörüler ile süreç optimizasyonuna katkıda bulunduğunu belirtmiştir. Bu çalışmalara paralel olarak, bu çalışmada hazırlanan karar ağacı modelinde de mesafe, maliyet ve emisyon katsayıları gibi önemli faktörler dikkate alınarak yol projelerinde doğal veya geri dönüştürülmüş agregaların tercihi taşıma mesafesine göre belirlenmiştir.

Karar ağacı modelinin performansını etkileyen bir diğer önemli unsur ise modelin yapılandırmasında kullanılan hiperparametrelerdir. Özellikle, ağacın derinlik parametresinin belirlenmesi, modelin doğruluk performansı ile genelleştirilebilirlik arasında denge kurulmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu neden çalışmada, derinlik parametresinin model performansını nasıl etkilediği de dikkate alınmıştır. Karar ağacının derinlik parametresi 4 olarak sınırlandırıldığında, modelin hem DA hem de GDBA sınıflarını yüksek bir doğruluk oranıyla başarılı bir şekilde sınıflandırdığı gözlemlenmiştir. Jafarimoghaddam ve ark. [25], benzer şekilde, sınırlı derinlikteki karar ağaçlarının hem genelleştirilebilirliği koruduğunu hem de aşırı öğrenme riskini azalttığını ifade etmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen çıkarımlara paralel olarak, karar ağacı modelimizde de özelliklerin etkisi başarıyla değerlendirilmiştir. Karar ağacı modelinin başarısı, AUC değerinin 0.97 olarak elde edilmesi ile açıkça ortaya konulmuştur. Bu yüksek performans ve doğruluk oranları, yalnızca sınıflandırma başarısını değil, aynı zamanda karar ağacı modelinin oluşturduğu karar sınırlarının DA ve GDBA tercihlerinin koşullara bağlı avantajlarını belirlemedeki etkinliğini de ortaya koymaktadır.

Modelin oluşturduğu karar sınırları DA ve GDBA tercihlerinin hangi koşullarda daha avantajlı olduğunu net bir şekilde göstermektedir. Karar sınırı grafikleri ve analizler, GDBA'nın genellikle daha uzun mesafelerde çevresel avantajlar sunduğunu, ancak taşımacılık mesafesinin artmasıyla bu avantajın azaldığını ortaya koymuştur. Bu durum, Kurda ve ark. [1] tarafından da desteklenmiştir; çalışmada, GDBA'nın karbon emisyonlarını azaltmada etkin olduğu ancak taşıma mesafesi arttıkça ekonomik avantajını kaybetme riskinin yüksek olduğu ifade edilmiştir. Ek olarak, Dias ve ark. [8] taşıma maliyetlerinin malzeme seçiminde belirleyici bir faktör olduğunu vurgulamış ve özellikle kısa mesafelerde çevresel ve ekonomik dengenin daha kolay sağlanabileceğini belirtmiştir. Karar sınırları üzerine yapılan değerlendirmeler, taşıma mesafelerinin optimize edilmesinin agrega seçimi üzerindeki kritik etkisini doğrulamaktadır. Spekkers ve ark. [26], mesafeye bağlı kararların inşaat projelerinde maliyet etkinliği sağlama konusunda hayati önem taşıdığını ve bu tür modellerin karar alıcılar için stratejik bir rehber olarak kullanılabileceğini vurgulamıştır. Bu çalışmada DA ve GDBA'nın farklı mesafe kombinasyonlarında tercih edilmesi gereken durumlar açıkça ortaya konmuş, bu sayede hem maliyet hem de çevresel sürdürülebilirlik dengesi sağlanmıştır.

Modelin kullanılan değişkenler açısından değerlendirilmesi DA ve GDBA mesafe değişkenlerinin karar sürecinde en etkili faktörler olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, mesafe temelli analizlerin agrega seçimi üzerindeki belirleyici etkisini doğrulamaktadır. Shin ve ark. [27], benzer şekilde, malzeme seçimi sırasında mesafenin karar süreçlerinde kritik bir rol oynadığını ve bu tür modellerin tercih doğruluğunu artırdığını belirtmiştir. Modelin özellikleri incelendiğinde, mesafe değişkenlerinin önem sıralamasında öne çıkması, karar ağacının yapı malzemesi seçiminde kullanılabilirliğini artırmaktadır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, yol dolgu projelerinde doğal agrega (DA) ve geri dönüştürülmüş beton agrega (GDBA) malzemelerinin taşıma mesafesi, maliyet ve emisyon faktörlerine bağlı olarak nasıl tercih edileceği, karar ağacı modeli ile analiz edilmiştir. Çalışmanın bulguları, kısa mesafelerde GDBA'nın çevresel avantajlarının öne çıktığını, uzun mesafelerde ise DA'nın maliyet üstünlüğü nedeniyle tercih edildiğini göstermiştir. Modelin performansı, ROC eğrisi ve AUC değeri ile desteklenmiş ve bu sonuçlar, taşıma mesafesine dayalı malzeme tercihlerinde bir rehber sunmuştur.

Analizlerde, farklı derinlik seviyelerinde model performansı detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Modelin derinlik seviyesi 9'dan sonra doğruluk artışının sınırlı olduğu ve genelleme yeteneğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, modelin daha fazla karmaşıklık eklendiğinde aşırı öğrenme riski taşıyabileceğini ve yeni veri üzerinde doğru tahmin yapma kapasitesinin azalabileceğini göstermektedir. Bu nedenle hem doğruluk hem de genelleme kapasitesini dengelemek adına derinlik 4 olarak seçilmiştir. Taşıma mesafesine bağlı malzeme tercihlerini belirlemede kullanılan karar ağacı modeli, 4. derinlikte sağlanan denge ile karar destek süreçlerinde daha güvenilir bir araç olarak değerlendirilmiştir.

Modelin genel sınıflandırma performansı, ROC eğrisi ve AUC değeri ile detaylandırılarak değerlendirilmiştir. ROC eğrisinin sol üst köşeye yakın bir konumda olması, modelin doğru pozitif oranını yüksek, yanlış pozitif oranını ise düşük tutarak etkili bir sınıflandırma gerçekleştirdiğini kanıtlamaktadır. Bu durum, modelin DA ve GDBA sınıflarını ayırt etme yeteneğini ortaya koymaktadır. Elde edilen 0.97 AUC değeri, modelin iki sınıfı da başarıyla ayırabildiğini ve tahmin doğruluğunun oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Bu yüksek AUC değeri, modelin rastgele bir tahmin sürecinden çok daha üstün olduğunu ve taşıma mesafesine bağlı malzeme seçimlerinde güvenilir bir sınıflandırma performansı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Karar sınırı analizleri, taşıma mesafesine dayalı olarak malzeme tercihlerinin optimizasyonunu görselleştirmek amacıyla yapılmıştır. Karar sınırı grafiği GDBA mesafesi (x) ve DA mesafesi (y) arasındaki ilişki y=0.80·x+10.39 matematiksel denklemle ifade etmektedir. Analiz sonuçlarına göre, taşıma mesafesinin kısa olduğu durumlarda (örneğin, her iki malzeme için de 40 km'nin altında), GDBA'nın karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli ve çevresel avantajlarının ön planda olduğu görülmüştür. Buna karşılık, taşıma mesafesi arttıkça (örneğin, her iki malzeme için de 60 km ve üzeri), DA'nın daha düşük taşıma maliyetleri nedeniyle ekonomik olarak daha avantajlı hale geldiği belirlenmiştir. Bu durum, taşıma maliyetleri ve emisyon katsayılarının malzeme seçimindeki kritik rolünü açıkça ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma DA ve GDBA tercihlerinin optimize edilmesine yönelik bir metodoloji sunarak, yol dolgularında çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği arasında bir denge kurma hedefini

desteklemektedir. Karar ağacı modeli, taşıma mesafesi, maliyet ve karbon emisyonu gibi çok boyutlu parametrelerin entegre bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlayarak, taşıma mesafesine bağlı olarak hangi malzemenin tercih edilmesi gerektiğini somut kriterlerle ortaya koymuştur. Ayrıca, Türkiye'deki geri dönüştürülmüş malzeme kullanımını teşvik etmeye yönelik karar ağacı modelinin yol projelerinde nasıl etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Gelecek çalışmalarda, modelin 100 km üzeri mesafeler için genişletilmesi ve farklı çevresel ve sosyal faktörlerin de kullanılarak daha geniş kapsamlı analizlerin yapılması önerilmektedir. Ayrıca, farklı coğrafi bölgelerdeki taşıma altyapılarının ve üretim süreçlerinin modele dahil edilmesi, sonuçların genelleştirilebilirliğini artıracaktır. Diğer makine öğrenimi yöntemlerinin karar destek süreçlerindeki performanslarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve farklı türde geri dönüştürülmüş malzemelerin analiz edilmesi de bu alandaki bilgi birikimine katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Çalışma, T.C. İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen ve Proje Kodu MÇAP-2023-44494 olan "Pazarcık-Kahramanmaraş'ta Meydana Gelen Deprem Sonrası Oluşan İnşaat Atıklarının Yol Üstyapısında Kullanım Uygunluğunun İnşaat ve Çevre Mühendisliği Açısından İncelenmesi" başlıklı Özel Çağrılı Genel Araştırma Projesi (ÖÇGAP) kapsamında gerçekleştirilmiştir. Proje desteği için İstanbul Teknik Üniversitesi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

Katkı Beyanı

Merve AKBAŞ: Analiz, Veri Düzenleme, Araştırma, Kaynaklar, Yazma-İlk Taslak. Recep İYİSAN: Kavramsallaştırma, Görselleştirme, Düzenleme, Danışmanlık, Proje Yönetimi.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makalenin yazarları, çalışma kapsamında herhangi bir kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Kaynaklar

- [1] Kurda R, Silvestre JD, de Brito J. Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. Resources, Conservation and Recycling 2018;139:407–417.
- [2] Ulucan M, Tas Y, Alyamac KE. Multi-objective optimization and assessment of recycled concrete aggregates for sustainable development: Example of the Kömürhan bridge. Structural Concrete 2023;24(5):5750–5768.
- [3] Akhtar A, Sarmah AK. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. Journal of Cleaner Production 2018;186:262–281.
- [4] Dilbas H, Şimşek M, Çakır Ö. An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. Construction and Building Materials 2014;61:50–59.
- [5] Bayraktar OY, Benli A, Bodur B, Öz A, Kaplan G. Performance assessment and cost analysis of slag/metakaolin-based rubberized semi-lightweight geopolymers with perlite aggregate: Sustainable reuse of waste tires. Construction and Building Materials 2024;411:134655.
- [6] Toka EB, Olgun M. Performance of granular road base and sub-base layers containing recycled concrete aggregate in different ratios. International Journal of Pavement Engineering 2022;23(11):3729–3742.
- [7] Gökalp İ, Uz VE, Saltan M, Tutumluer E. Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications. Transportation Geotechnics 2018;14:61–69.

- [8] Dias AB, Pacheco JN, Silvestre JD, Martins IM, de Brito J. Environmental and economic life cycle assessment of recycled coarse aggregates: A Portuguese case study. Materials 2021;14(18):5452.
- [9] Bostanci SC. Use of waste marble dust and recycled glass for sustainable concrete production. Journal of Cleaner Production 2020;251:119785.
- [10] Aytekin B, Mardani A, Ünsever YS. Performance assessment of recycled waste materials for use in unbound pavement layers: A case study from Turkey. Construction and Building Materials 2023;402:133004.
- [11] Akbas M, Iyisan R, Dayioglu AY, Hatipoglu M. Stiffness properties of recycled concrete aggregates as unbound base and subbase materials under freeze and thaw cycles. Arabian Journal for Science and Engineering 2021;46(11):10569–10584.
- [12] Lin CL, Fan CL. Decision tree analysis of the relationship between defects and construction inspection grades. International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing 2019;7(1):27–32.
- [13] Hasan R, Islam Z, Alam M. Predictive analytics and machine learning applications in the USA for sustainable supply chain operations and carbon footprint reduction. Journal of Electrical Systems 2024;20(10s):463–471.
- [14] Sarmas E, Dimitropoulos N, Marinakis V, Mylona Z, Doukas H. Transfer learning strategies for solar power forecasting under data scarcity. Scientific Reports 2022;12(1):1–13.
- [15] Khan MJUR, Awasthi A. Machine learning model development for predicting road transport GHG emissions in Canada. WSB Journal of Business and Finance 2019;53(2):55–72.
- [16] Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi. T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü; 2008.
- [17] Akbas M, Iyisan R. Sustainable infrastructure: The effect of freeze-thaw cycles on road base materials comprising natural and recycled concrete aggregates. International Journal of Sustainable Engineering 2023;16(1):211–223.
- [18] Sabău M, Bompa DV, Silva LF. Comparative carbon emission assessments of recycled and natural aggregate concrete: Environmental influence of cement content. Geoscience Frontiers 2021;12(6):101235.
- [19] Pradhan S, Tiwari BR, Kumar S, Barai SV. Comparative LCA of recycled and natural aggregate concrete using particle packing method and conventional method of design mix. Journal of Cleaner Production 2019;228:679–691.
- [20] Xing W, Tam VW, Le KN, Hao JL, Wang J. Life cycle assessment of sustainable concrete with recycled aggregate and supplementary cementitious materials. Resources, Conservation and Recycling 2023;193:106947.
- [21] Tang Y, Xiao J, Liu Q, Xia B, Singh A, Lv Z, Song W. Natural gravel-recycled aggregate concrete applied in rural highway pavement: Material properties and life cycle assessment. Journal of Cleaner Production 2022;334:130219.
- [22] Marinković S, Radonjanin V, Malešev M, Ignjatović I. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. Waste Management 2010;30(11):2255–2264.
- [23] Mistikoglu G, Gerek IH, Erdis E, Usmen PM, Cakan H, Kazan EE. Decision tree analysis of construction fall accidents involving roofers. Expert Systems with Applications 2015;42(4):2256–2263.
- [24] Lin J, Zhong C, Hu D, Rudin C, Seltzer M. Generalized and scalable optimal sparse decision trees. In: International Conference on Machine Learning; 2020, November. p. 6150–6160. PMLR.
- [25] Jafarimoghaddam A, Hamidi JK, Najafi M. Application of decision tree to selection of MTBM for adverse geological conditions. International Journal of Mining Science and Technology 2013;23(4):503–511.
- [26] Spekkers MH, Kok M, Clemens FHLR, Ten Veldhuis JAE. Decision-tree analysis of factors influencing rainfall-related building structure and content damage. Natural Hazards and Earth System Sciences 2014;14(9):2531–2547.
- [27] Shin Y, Kim T, Cho H, Kang KI. A formwork method selection model based on boosted decision trees in tall building construction. Automation in Construction 2012;23:47–54.



Adıyaman University Journal of Engineering Sciences Adyü J Eng Sci 2025;12(25):60-71 Adıyaman Üniversitesi

Research Article / Araştırma Makalesi

Mühendislik Bilimleri Dergisi Adyü Müh Bil Derg 2025;12(25):60-71 https://doi.org/10.54365/adyumbd.1521453

Termal Kamera Görüntülerinin Çoklu Sınıflandırılması İçin Derin Öğrenme Tabanlı Tekniklerin Performans Karşılaştırılması

Performance Comparison of Deep Learning Based Techniques for Multiclass Classification of Thermal Camera Images

Merve Kesim Önal 1*, Halil Uslu 20, Engin Avcı 20, Derya Avcı 20

¹ Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye
² Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

Öz

Termal kameralar, cisimlerin sıcaklık farklılıklarını kızılötesi ışın görüntüleme değerlerine bağlı olarak renklendirdiği sistemleridir. Günümüzde başta savunma sanayi olmak üzere sağlık, ziraat, inşaat gibi birçok farklı alanda termal kameralar kullanılmaktadır. Özellikle savunma sanayi alanında kullanılan bu kameralardan elde edilen görüntüler, çeşitli nesnelerin ve canlıların tespiti için büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada termal kamera görüntülerinin sınıflandırması için derin öğrenme tabanlı tekniklerin kapsamlı bir karsılaştırması sunulmaktadır. Çalışmada 7 farklı Evrişimli Sinir Ağları mimarisi ile görüntülerin özellikleri çıkarılmış, 5 farklı sınıflandırma yöntemi ile sınıflandırılması sağlanmıştır. Performans değerlendirmesi icin dengesiz cok sınıflı veri kümelerinin sınıflandırılmasına uygun metrikler olan dengeli doğruluk, makro ve mikro ortalama duyarlılık, makro ve mikro ortalama kesinlik, makro ve mikro ortalama F ölçütü metrik değerleri kullanılmıştır. Ayrıca tüm yapıların avrı avrı eğitim ve test süreleri karşılaştırılmıştır. %95.24 Çalışmada en yüksek doğruluk değeri ile Resnet101+Softmax ve Resnet50+DVM mimarilerinde elde edilmiştir. Sınıfların eşit ağırlıklı alındığı dengeli doğruluk değerinde ise en yüksek %95,17 ile Resnet101+Softmax mimarisinden elde edilmiştir. Resnet101+Softmax mimarisinde makro ortalamalı kesinlik 0.9579, makro ortalamalı F ölçütü 0.9543 ve mikro ortalamalı F ölçütü 0.9524 değerleri elde edilmiştir. Bu çalışma, küçük ve dengesiz termal görüntüler üzerinde, önceden eğitilmiş ESA ağlarının özellik çıkarımı ile makine öğrenimi sınıflandırıcılarının kullanımının, tamamen eğitilmiş ağlarla elde edilen performansa benzer sonuçlar sağlanabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Termal Görüntü, Derin Öğrenme, Çok Sınıflı Sınıflandırma Abstract

Thermal camera systems are imaging systems that color the temperature differences of objects depending on their infrared ray values. Nowadays, thermal cameras are used in many different areas such as defense industry, health, agriculture and construction. Detection of various objects and living creatures in the images taken by these cameras, which are used especially in the field of defense industry, is of great importance. This study presents a comprehensive comparison of deep learning-based techniques for classification of thermal camera images. In the study, the features of the images were extracted with 7 different Convolutional Neural Network architectures and they were classified with 5 different classifiers. For performance evaluation, balanced accuracy, macro and micro average sensitivity, macro and micro average precision, macro and micro average F criterion metric values, which are metrics suitable for classification of unbalanced multi-class data sets, were used. Additionally, the training and testing times of all structures separately were compared. In the study, the highest accuracy value of 95.24% was achieved with ResNet101+Softmax and ResNet50+DVM architectures. The highest balanced accuracy, where class weights were equally considered, was obtained as 95.17% with the ResNet101+Softmax architecture. ResNet101+Softmax model yielded a macro-averaged precision of 0.9579, a macro-averaged F-measure of 0.9543, and a microaveraged F-measure of 0.9524. This study demonstrates that, on small and imbalanced thermal images, the utilization of pretrained ESA networks for feature extraction combined with machine learning classifiers can deliver performance comparable to that achieved with fully trained deep learning models

Keywords: Thermal Image, Deep Learning, Multi-Class Classification

* Sorumlu yazar e-posta (Corresponding e-mail): <u>merve.kesim@ozal.edu.tr</u> Geliş Tarihi (Received): 25.07.2024, Kabul Tarihi (Accepted): 08.03.2025

1. Giriş

Günümüzde birçok görüntü alma sistemi bulunmaktadır. Bunlara; enerji yüklü röntgen ışınlarının farklı yapılardan dönmesiyle görüntü alan röntgen cihazları, ses dalgaları aracılığıyla görüntü oluşturabilen ultrason cihazları, elektromanyetik kuvvet radyo frekansları ile görüntü elde eden MR cihazları, radar kullanarak yer altındaki değerli maden, su kaynağı, yeraltı boşlukları gibi verileri 2 veya 3 boyutlu görüntülevebilen çeşitli dedektörler, kızılötesi ışınlar ile ısıya bağlı görüntüleme yapabilen termal görüntüleme sistemleri örnek olarak verilebilir. Termal görüntüleme sistemleri, elektromanyetik spektrumda yer alan IR (kızılötesi) enerjiyi esas almaktadır. Termal kameralar ilk olarak güvenlik amaçlı, savunma alanında kullanılmaya başlanmış zamanla sağlık, ziraat, inşaat gibi birçok farklı alanda kullanılmıştır. Özellikle savunma sanayi alanında kullanılan hava araçları için termal kameralar spesifik bir öneme sahiptir. Termal kameralardan elde edilen görüntüler ile ateşleme sistemlerinin geliştirilmesi, otonom kullanım, karakol ve sınır güvenliğinin sağlanması, boru hatları ve pompa istasyonlarının güvenliğinin sağlanması gibi uygulamalar yapılmaktadır. Bu uygulamaların birçoğu görüntülerdeki canlı-cansız nesnelerin tespiti ile gerçekleştirilmektedir [1]. Termal görüntülerdeki nesne sınıflandırmasının insan gözüyle yapılması hem çok fazla insan gücü gerektirmekte hem de hata payını arttırmaktadır. Bu nedenle termal kamera sistemlerinden elde edilen görüntüler üzerinde makine öğrenmesi ve derin öğrenme gibi yapay zekâ teknikleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada derin öğrenme tabanlı tekniklere çeşitli sınıflandırma algoritmaları dahil edilerek termal kamera görüntü sınıflandırmasının yapılması amaçlanmıştır.

Sınıflandırma algoritmalarının performansını değerlendirmenin çeşitli yolları bulunmaktadır. Performans ölçümü, doğruluk, duyarlılık ve özgüllük gibi farklı metriklerle yapılmaktadır. İki sınıflı sınıflandırma problemlerinde bu ölçümler, sınıflandırıcılar arasında karşılaştırma yapmayı kolaylaştırsa da çok sınıflı sınıflandırma problemlerinde değerlendirme süreci daha karmaşık bir hale gelmektedir. Özellikle, dengesiz veri dağılımlarında bazı sınıfların yeterince temsil edilmemesi, belirli sınıfların performanslarının göz ardı edilmesine yol açabilmektedir. Bu durum, modelin gerçek dünya uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılabilirliğini sınırlandırabilir. Dolayısıyla, çok sınıflı sınıflandırma problemlerinde kullanılan öğrenme algoritmalarının performanslarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, analiz edilmesi ve elde edilen sonuçların doğru yorumlanması büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşımlar, sınıflandırma modellerinin adil ve dengeli bir şekilde geliştirilmesi için kritik bir ihtiyaçtır.

Bu çalışmada, termal kamera görüntüleri üzerinde temel ESA mimarilerinin ağırlıklarının güncellenmesi yoluyla gerçekleştirilen eğitim süreci ile önceden eğitilmiş ESA ağlarından özellik çıkarımı yapılarak makine öğrenimi sınıflandırıcılarının performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, çok sınıflı sınıflandırmalarda kullanılan değerlendirme ölçütlerine yönelik ayrıntılı bir uygulama örneği sunulmuştur.

Literatürde araştırmacılar farklı alanlarda kullanılan termal görüntülerdeki nesnelerin tespiti için bazı yöntemler önermişlerdir. Youngjun Cho vd. [2] yaptıkları çalışmada, İnsanların her yerde bulunan teknolojileri kullanarak malzemelerin yakın mesafeden otomatik olarak tanınmasına yönelik yeni bir yaklaşım olan Derin Termal Görüntülemeyi önermişlerdir. Önerdikleri yöntem, bir akıllı telefona entegre edilmiş düşük maliyetli mobil termal kamera ile elde edilen termal doku görüntülerini derin bir sinir ağı kullanarak malzeme türlerine göre sınıflandırır. Sistemin performansı hem iç hem de dış ortamlarda 32 malzeme türünü tanıyacak şekilde eğitilerek değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda 15 iç mekân malzemesinin 98%'in üzerinde doğruluk ve 17 dış mekân malzemesinin de 89%'un üzerinde doğruluk ile sınıflandırması yapılmıştır. Furat Al-Obaidy vd. [3] yaptıkları çalışmada, bir Baskılı Devre Kartı (PCB) modelinin Tümleşik Devre (IC) arıza algılaması için termal görüntü işleme kullanınışlardır. Çalışmada görüntü sınıflandırma ve algılama için çok katmanlı algılayıcı, destek vektör makinesi ve uyarlanabilir nöron-bulanık çıkarım sistemi olmak üzere üç yumuşak hesaplama tekniği kullanılmıştır. Modellerin etkinliği, sınıflandırmanın performansı ve doğruluğu karşılaştırılmıştır. Benzer bir çalışma da Akshay A.

Sarawade ve Nadir N. Charniya [4] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada PCB'deki hatalı IC'lerin tespit edilmesi amacıyla Hızlandırılmış Sağlam Özellikler (SURF) algoritması kullanılarak görüntü eşleştirme gerçekleştirilmiştir. Jiang A. vd. [5] termal görüntüler aracılığıyla ağaç gövdesi tespiti için çeşitli derin öğrenme modellerini incelemiş ve farklı mimarilerin doğruluk ve hız performansları hakkında önemli bulgular sunmuştur. Bu tür karşılaştırmalı analizler, termal görüntüleme uygulamaları için en uygun modellerin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Memari M. vd. [6] tarafından yürütülen çalışmada termal ve RGB görüntüleme yöntemleri kullanılarak rüzgar türbini kanatlarının denetiminde %100 doğruluk oranına ulaşan bir topluluk modeli sunarak, daha yüksek performans elde etmek amacıyla farklı derin öğrenme tekniklerinin entegrasyonunun potansiyelini vurgulamışlardır.

Termal görüntü işleme yöntemleri ile ilgili sağlık alanında da farklı bir çok çalışma mevcuttur. R. Roslidar vd. [7] yaptıkları derleme çalışmasında, memedeki sıcaklık dağılımını gözlemleyerek Non-invaziv ve temassız bir kanser tarama yöntemi olan termografiden elde edilen görüntüler üzerinde uygulanmış derin öğrenme modellerinin incelemesini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma, meme termogramı sınıflandırması için derin sinir ağlarının uygulanmasıyla ilgili çoğu araştırmayı ele almıştır. Yapılan incelemelerde sığ katmanlara ve az parametreye sahip derin ağların, yüksek doğruluğu korurken simülasyon süresini azaltma yetenekleri sayesinde iyi performans gösterdiği saptanmıştır. Çalışma sonucunda mevcut sinir ağı modellerinin, özellikle sağlıklı ve kanserli vakaları ayırt etmede, meme kanseri termogram sınıflandırmasının doğruluğunda bir artışa yol açtığını göstermiştir. Termal görüntüler çeşitli yöntemler uygulanarak yüz tanıma için kullanılmıştır [8], [9]. G. Koukiou ve V. Anastassopoulos [10] yaptıkları çalışmada alkol almış kişilerin tanınması için termal görüntüler üzerinde derin öğrenme tekniklerini kullanımıştır.

Savunma alanında da termal görüntüler sıklıkla kullanılmıştır[11], [12]. Mayın tespit sistemleri için de termal görüntü tabanlı çeşitli yöntemler mevcuttur[13], [14].C.N. Naga Priya vd. [15] termal görüntülerdeki gömülü nesneleri tanımlamak için derin öğrenme bölgesi konvolüsyonuna dayalı sinir ağı yaklaşımını önermişlerdir. Çalışmada kapsamında gerçekleştirilen deneysel sonuçlardan, toprağın ısı taşıma kapasitesindeki değişime bağlı olarak gömülü nesnelerin termal görüntülerinde sıcaklık değişimi olduğu bulunmuştur. Bu değişimin tespiti için önerilen sinir ağı yöntemi ile termal görüntülerindeki gömülü nesnelerin konumları 90% doğruluk değeriyle tespit edilmiştir. Savunma alanında kullanılan termal görüntüleme yöntemlerden biri de otomatik hedef tespiti sistemleridir. A. d'Acremont vd. [16] otomatik hedef tespiti için cfCNN olarak adlandırılan, küresel ortalama havuzlama (GAP) ile kompakt ve evrişimli bir sinir ağı önermişlerdir.

Literatürde ayrıca bazı ESA mimarilerinin doğruluk, çıkarım zamanı, hafıza gibi faktörler yönünden karşılaştırmaları Canziani A. vd.[17] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, ImageNet yarışmasında sunulan Alexnet [18], Network in Network (NIN) [19], Enet [20], Googlenet [21], VGG-16 ve -19 [22], Resnet-18, -34, -50, -101 ve -152 [23], Inception-v3 [24] ve Inception-v4 [25] mimarileri karşılaştırılmıştır. Çalışmaya göre doğruluk açısından Resnet ve Inception mimarileri, diğer tüm mimarileri en az 7% gibi önemli bir farkla geride bırakmıştır.

Bu çalışmada, savunma sanayinde sıklıkla kullanılan termal kamera görüntülerindeki nesnelerin sınıflandırmasının hızlı ve doğru yapılabilmesi için derin öğrenme tabanlı teknikler önerilmiştir. Çalışmada kullanılan veri setine ait bilgiler 2. bölümde, uygulanan yöntem 3. bölümde, deneysel sonuçlar ile ilgili bilgiler ise 4. bölümde verilmiştir.

2. Materyal ve Metod

Çalışmada toplamda 4 kategoriden oluşan 836 termal görüntü kullanılmıştır. Veriler açık erişimi olan Kaggle platformunda bulunan "visible_thermal"[26], "HIT-UAV: A High-altitude Infrared Thermal Dataset"[27] ve "Thermal Mannequin Fall Image Dataset"[28] veri setlerinde bulunan görüntülerden 4 sınıf oluşturacak şekilde alınarak elde edilmiştir. Veri setinde içerisinde araba bulunan 198 termal kamera

görüntüsü, içerisinde ev bulunan 100 termal kamera görüntüsü, içerisinde çeşitli hayvanların bulunduğu 204 termal kamera görüntüsü, içerisinde 334 insan bulunan termal kamera görüntüsü bulunmaktadır. Şekil 1'de çalışmada kullanılan veri setindeki her bir sınıfın örnek görüntüleri verilmiştir.



Şekil 1. Veri setindeki kategorilere ait termal kamera görüntüleri örnekleri: (a) Araba içeren termal kamera görüntüleri (b) Ev içeren termal kamera görüntüleri (c) Hayvan içeren termal kamera görüntüleri (d) İnsan içeren termal kamera görüntüleri

Çalışmanın temel amacı, termal kamera görüntülerini insan, hayvan, ev ve araç olacak şekilde 4 sınıfta sınıflandırmanın hızlı ve yüksek doğrulukla yapılabilmesi için çeşitli derin öğrenme ve makine öğrenmesi tekniklerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesidir. Süreç dört aşamadan oluşmaktadır. İlk adımda veri setindeki tüm termal görüntülerin girişi yapılmıştır. İkinci adımda, literatürde yaygın olarak kullanılan evrişimli sinir ağı (ESA) mimarilerinde özellik çıkarma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada kullanılan tüm ESA mimarilerinin genel yapısı (konvolüsyon ve havuzlama katmanları) korunmuştur. Çıkarılan özellikler, holdout yöntemi ile %70 eğitim ve %30 test verisi olarak ayrılmıştır. Üçüncü adımda, iki farklı sınıflandırma yöntemi uygulanmıştır. İlk yöntemde, ESA mimarilerinin ağırlıkları güncellenerek Softmax sınıflandırıcı ile bir öğrenme süreci gerçekleştirilmiştir. İkinci yöntemde ise ESA mimarilerinin tam bağlantı katmanlarından çıkarılan öznitelikler, Destek Vektör Makineleri (DVM) [29], K En Yakın Komşuluk (KNN) [30], Navie Bayes [31] ve Diskriminant Analizi [32] gibi yaygın makine öğrenmesi sınıflandırma algoritmaları ile sınıflandırılmıştır. Son olarak, dördüncü adımda, test verileri üzerinde doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan ESA mimarilerinin genel yapısı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Kullanılan yöntemlerin genel yapısı

2.1. Kullanılan Sinir Ağları Mimarileri

Çalışma kapsamında literatürde en sık kullanılan Evrişimsel Sinir Ağları mimarilerinden AlexNet, GoogleNet, ResNet-18,-50,-101, Inceptionv3, Densenet201 [33] kullanılmıştır. Bu mimariler MATLAB'da M-file kodları aracılığıyla doğrudan yapılandırılmıştır. Çalışmada, termal kamera görüntüleri üzerinde iki farklı yöntem uygulanmıştır. İlk yöntemde, her bir ESA mimarisi, ImageNet veri seti üzerinde önceden eğitilmiş ağırlıklarla kullanılmış ve bu modellerin tam bağlantı katmanları, son özellik çıkarımı katmanı olarak değerlendirilmiştir. Bu özellikler, Destek Vektör Makineleri (SVM), K-En Yakın Komşuluk (KNN), Naive Bayes ve Diskriminant Analizi gibi farklı makine öğrenimi sınıflandırıcıları ile sınıflandırılmıştır. İkinci yöntemde ise ESA mimarilerinin ağırlıkları güncellenerek, Softmax sınıflandırıcı ile tam bir eğitim süreci gerçekleştirilmiş ve kullanılan tüm mimari yapıların performansları karşılaştırılmıştır. Kullanılan ESA mimarileri hakkında genel bilgiler Çizelge 1'de verilmiştir.

Mimari	Yıl	Derinlik	Parametre Sayısı	Görüntü Giriş Boyutu	Toplam Katman Sayısı	Öznitelik Elde Katmanı
Alexnet	2012	8	61 M	227*227	25	fc8
Googlenet	2014	22	7 M	224*224	144	loss3-classifier
Resnet18	2015	18	11,7 M	224*224	71	fc1000
Resnet50	2015	50	25,6 M	224*224	177	fc1000
Resnet101	2015	101	44,6 M	224*224	347	fc1000
Inceptionv3	2015	48	23,9 M	299*299	315	predictions
Densenet201	2017	201	20 M	224*224	708	fc1000

Cizelge 1.	Kullanılan	ESA	Mimarilerine	Genel	Bakıs
ÇIZCIZC I.	Rumannan	LOIL	1 minumerne	Other	Dang

2.2. Performans Değerlendirme Metrikleri

Bir makine öğrenimi algoritmasında kurulan modeli değerlendirmek için, performansın nicel ölçütleri bulunmaktadır. Birçok yaygın sınıflandırma metriğini hesaplanması karmaşıklık matrisi kullanılır. Hedef

değişkenlerinin sınıflarına ait gerçek ve tahmin edilen değerlerinin gösterildiği matrise karmaşıklık matrisi adı verilir. Sadece iki sınıfın olduğu ikili sınıflandırma ve sınıf sayısının ikiden fazla olduğu çok sınıflı sınıflandırma için kullanılan karmaşıklık matrisleri Çizelge 2 ve Çizelge 3'te verilmiştir [34].

	Çizelge 2. İki Sınıflı Karmaşıklık Matrisi.							
		Pozitif	Negatif	Toplam				
X	Pozitif	Doğru Pozitif (DP)	Yanlış Negatif (YN)	DP+YN				
erçe	Negatif	Yanlış Pozitif (YP)	Doğru Negatif (DN)	YP+DN				
G	Toplam	DP+YP	YP+DN	m				

İki sınıflı sınıflandırma problemlerinde sınıflandırıcılarının performansını karşılaştırmak için Doğruluk (Accuracy,Acc), Duyarlılık (Recall,R), Kesinlik (Precision,P) ve F Ölçütü (F1-Score) gibi ölçütler hesaplanmaktadır. Bu metriklerin Çizelge 2'ye göre hesaplanan matematiksel ifadeleri Eşitlik 1-4' de verilmiştir [35], [36].

$$Acc = \frac{DP + DN}{DP + YP + YN + DN}$$
(1)
$$R = \frac{DP}{DP + YN}$$
(2)

$$P = \frac{DP}{DP + YP}$$
(3)

$$F1 = \frac{2*P*R}{P+R}$$
(4)

Çok sınıflı sınıflandırma problemlerinde (özellikle sınıflar eşit dağılmadığında) değerlendirme metrikleri için tüm sınıfları eşit temsil edecek ölçümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Dengeli Doğruluk hem ikili hem de çok sınıflı sınıflandırma için iyi bilinen bir ölçüdür. Dengeli Doğruluk, her sınıfın duyarlılığının aritmetik ortalamasından oluşmaktadır. Bu her sınıfın aynı ağırlığa ve aynı öneme sahip olmasını sağlar. Böylelikle daha az birimi olan küçük sınıfların sonuç üzerinde orantısal etkiden daha fazla etki etmesi sağlanır[35]. Dengeli doğruluk değerinin yanı sıra çok sınıflı sınıflandırma söz konusu olduğunda, özellikle F ölçütü tüm sınıfları içermelidir. Bu bağlamda çok sınıflı F ölçütünün hesabı için iki tür ölçüm vardır: Makro Ortalamalı F Ölçütü ve Mikro Ortalamalı F Ölçütü. Makro ortalamalı F ölçütü, sınıflar üzerinden F ölçütünin ortalamasını hesaplar. Mikro ortalamalı F ölçütü ise sınıflar arasında örnek başına düşen sınıflandırmaları bir araya toplar ve genel F ölçütünü hesaplar.

Makro ortalama, her sınıfa eşit ağırlık verirken, mikro ortalama, birim başına her bir sınıflandırma kararına eşit ağırlık verir [35], [37]. Çok sınıflı bir sınıflandırma problemi için ihtiyaç duyulan karışıklık matrisi Çizelge 3'te verilmiştir.

	Çizelge 3. Çok sınıflı karmaşıklık matrisi.								
			Tahmin						
		Sınıf ₁	S1n1f2	•••	Sınıf _n	Toplam			
	Sınıf ₁	DP_1	H_{12}		H_{1n}	T_{satir_1}			
¥	S1n1f ₂	H ₂₁	DP_2		H _{2n}	T _{satir2}			
ıçe	•••								
Ge	Sınıf _n	H_{n1}	H _{n2}		DP_n	T _{satırn}			
	Toplam	$T_{\underline{s\"utun_1}}$	T _{sütun2}		T _{sütunn}	m			
Çok sınıflı sınıflandırma problemlerinde (özellikle sınıflar eşit dağılmadığında) değerlendirme metrikleri için tüm sınıfları eşit temsil edecek ölçümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Dengeli Doğruluk hem ikili hem de çok sınıflı sınıflandırmada iyi bilinen bir ölçüdür. Dengeli Doğruluk, her sınıfın duyarlılığının aritmetik ortalamasından oluşmaktadır. Bu her sınıfın aynı ağırlığa ve aynı öneme sahip olmasını sağlar. Böylelikle daha az birimi olan küçük sınıfların sonuç üzerinde orantısal etkiden daha fazla etki etmesi sağlanır.

Dengeli doğruluk değerinin yanı sıra çok sınıflı sınıflandırma söz konusu olduğunda, özellikle F ölçütü tüm sınıfları içermelidir. Bu bağlamda çok sınıflı F ölçütünün hesabı için iki tür ölçüm vardır: Makro Ortalamalı F Ölçütü ve Mikro Ortalamalı F Ölçütü. Makro ortalamalı F ölçütü, sınıflar üzerinden F ölçütlerinin ortalamasını hesaplar. Mikro ortalamalı F ölçütü ise sınıflar arasında örnek başına düşen sınıflandırmaları bir araya toplar ve genel F ölçütünü hesaplar. Makro ortalama, her sınıfa eşit ağırlık verirken, mikro ortalama, birim başına her bir sınıflandırma kararına eşit ağırlık verir [35], [37].

Çok sınıflı sınıflandırma problemlerinde Çizelge 3 yardımıyla hesaplanan değerlendirme metrikleri Dengeli Doğruluk ($Acc_{balanced}$), Makro Ortalamalı Duyarlılık (R_{Macro}), Makro Ortalamalı Kesinlik (P_{Macro}), Makro Ortalamalı F Ölçütü ($F1_{Macro}$), Mikro Ortalamalı Duyarlılık (R_{Micro}), Mikro Ortalamalı Kesinlik (P_{Micro}), Mikro Ortalamalı F Ölçütü ($F1_{Micro}$), Eşitlik 5-11'de verilmiştir. Eşitliklerde verilen K değeri sınıf sayısını temsil etmektedir.

$$Acc_{balanced} = \frac{\sum_{k=1}^{K} \frac{DP_k}{T_{satir_k}}}{K}$$
(5)

$$R_{Macro} = \frac{\sum_{k=1}^{K} \operatorname{Rec}_{k}}{K}$$
(6)

$$P_{Macro} = \frac{\sum_{k=1}^{K} Pre_k}{K}$$
(7)

$$F1_{Macro} = 2^* \left(\frac{\text{Makro Avg Pre*Makro Avg Rec}}{\text{Makro Avg Pre+Makro Avg Rec}} \right)$$
(8)

$$R_{Micro} = \frac{\sum_{k=1}^{K} DP_k}{\sum_{k=1}^{K} T}$$
(9)

$$P_{\text{Minus}} = \frac{\sum_{k=1}^{K} DP_k}{\sum_{k=1}^{K} DP_k}$$
(10)

$$F_{Micro} = \frac{\sum_{k=1}^{K} T_{sütun_k}}{\sum_{k=1}^{K} DP_k}$$
(10)
(11)

$$F1_{Micro} = \frac{-K - 1 - K}{m} \tag{11}$$

Eşitlik 1 ve Eşitlik 9-11'den de görüleceği üzere doğruluk, Mikro Ortalamalı Duyarlılık ve Mikro Ortalamalı Kesinlik ölçümleri birbirine eşittir. Buradan yola çıkarak Mikro Ortalamalı Duyarlılık ve Mikro Ortalamalı Kesinlik ölçülerinin harmonik ortalaması olan Mikro Ortalama F ölçütü de Doğruluk formülüne eşit çıkmaktadır [35]. Aynı şekilde Dengeli doğruluk ile Makro Ortalamalı Duyarlılık ölçümleri de birbirine eşittir. Bu nedenle bu çalışmada Makro ve Mikro ölçümler arasından yalnızca makro ortalamalı Kesinlik ve F ölçütü sonuçları verilmiştir.

3. Araştırma Bulguları

Çalışmada termal görüntülerde nesne tespitinde özellik çıkarımı için en başarılı ESA mimarisinin hangisi olduğu ve sık kullanılan çeşitli ESA mimarileri ile çeşitli sınıflandırıcılar arasında en iyi kombinasyonun hangisi olduğunun tespiti için karşılaştırmalar yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

Yapılan tüm çalışmalar, 12. Nesil Intel Core i7 3.50 GHz işlemci, 16GB DDR4 RAM ve 8GB NVIDIA GeForce RTX 3070 ekran kartına sahip bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Tüm çalışmalar, 64 bitlik Windows 11 işletim sistemi üzerinde kurulu Matlab R2021a üzerinde derlenmiştir. Özellik çıkarımı sırasında batch size 32 olarak tüm makine öğrenmesi yöntemleri kullanan mimariler için aynı kullanılmış özellikler satır halinde sınıflandırıcılara verilmiştir. Softmax kullanılan mimarilerde ise 0.001 başlangıç öğrenme oranı, sgdm optimizasyonu, 20 epoch, 32 batch size parametreleri kullanılmıştır.

Mimari	Sınıflandırıcı	Doğruluk (%)	Dengeli Doğruluk (%)	P _{Macro}	F1 _{Macro}	F1 _{Micro}	Toplam Eğitim ve Test Süresi (sn)
	Softmax	92,06%	91,33%	0,9144	0,9128	0,9206	61,37
	DVM	89,68%	89,75%	0,8945	0,8950	0,8968	2,23
Alexnet	KNN	86,51%	82,25%	0,8722	0,8391	0,8651	2,03
	Navie Bayes	84,13%	84,69%	0,8287	0,8355	0,8413	3,15
	Diskr. Analizi	92,86%	92,33%	0,9404	0,9285	0,9286	3,18
	Softmax	93,65%	92,33%	0,9494	0,9340	0,9365	61,13
	DVM	90,48%	90,97%	0,8967	0,9021	0,9048	4,28
ResNet18	KNN	89,68%	87,44%	0,8973	0,8846	0,8968	4,04
	Navie Bayes	86,51%	88,44%	0,8668	0,8734	0,8651	4,43
	Diskr. Analizi	89,68%	89,11%	0,8858	0,8846	0,8968	3,33
	Softmax	94,44%	92,00%	0,9422	0,9294	0,9444	213,96
	DVM	95,24%	94,86%	0,9651	0,9562	0,9524	7,13
ResNet50	KNN	89,68%	90,97%	0,9036	0,9050	0,8968	6,79
	Navie Bayes	86,51%	88,72%	0,8724	0,8754	0,8651	6,52
	Diskr. Analizi	93,65%	93,53%	0,9319	0,9332	0,9365	4,00
	Softmax	95,24%	95,17%	0,9579	0,9543	0,9524	235,35
	DVM	91,27%	91,39%	0,9102	0,9115	0,9127	4,57
ResNet101	KNN	86,51%	84,16%	0,8602	0,8477	0,8651	4,35
	Navie Bayes	80,95%	80,08%	0,8287	0,8131	0,8095	5,82
	Diskr. Analizi	93 <i>,</i> 65%	94,36%	0,9374	0,9394	0,9365	5,57
	Softmax	92,06%	91,58%	0,9338	0,9260	0,9206	390,51
	DVM	89,68%	89,75%	0,9070	0,9008	0,8968	10,07
Inceptionv3	KNN	88,89%	86,55%	0,8842	0,8731	0,8889	4,39
	Navie Bayes	88,10%	89,03%	0,8908	0,8858	0,8810	6,27
	Diskr. Analizi	88,89%	86,77%	0,8979	0,8794	0,8889	5,21
	Softmax	92,86%	92,72%	0,9397	0,9330	0,9286	202,98
	DVM	92,06%	93,11%	0,9375	0,9341	0,9206	3,29
Googlenet	KNN	87,30%	83,97%	0,8937	0,8574	0,8730	3,10
	Navie Bayes	84,13%	84,80%	0,8396	0,8429	0,8413	6,59
	Diskr. Analizi	91,27%	89,05%	0,9444	0,9126	0,9127	9,03
	Softmax	90,48%	89,05%	0,9235	0,9044	0,9048	1,53*103
	DVM	92,86%	92,75%	0,9395	0,9331	0,9286	11,62
DenseNet201	KNN	91,27%	91,58%	0,9201	0,9145	0,9127	11,73
	Navie Bayes	82,54%	83,58%	0,8303	0,8280	0,8254	11,71
	Diskr. Analizi	93,65%	92,39%	0,9514	0,9362	0,9365	18,29

Çizelge 4. Kullanılan mimari ve sınıflandırıcıların sınıflandırma sonuçları.

Her bir ESA mimarisine entegre edilen beş sınıflandırıcının sınıflandırma sonuçları Çizelge 4'te karşılaştırılmıştır. Tüm sınıflandırıcıların doğruluk değerleri karşılaştırıldığında Resnet101+Softmax ve Resnet50+DVM mimarileri 95,24% doğruluk değeri ile elde edilen tüm sınıflandırmalardan daha yüksek bir başarım elde etmişlerdir. Sınıfları eşit ağırlıklı olarak alan dengeli doğruluk değerine göre 95,17% ile en yüksek başarım olan mimari Resnet101+Softmax mimarisidir. Doğruluk değerinde yüksek başarımı olan Resnet101+Softmax mimarisidir. Doğruluk değeri 0,9579 ile en yüksek kesinlik değerleri arasındadır. Bunun yanında yine Resnet50+DVM ve Resnet101+Softmax mimarileri için sınıfların eşit temsil edildiği Makro ortalamalı F ölçütü sırasıyla 0,9562 ve 0,9543 değerleri ile diğer sınıflandırmalara göre daha yüksek bulunmuştur. Bu da modellerin hem doğru pozitif değerlerini hem de doğru negatif değerlerini iyi tahmin ettiğini göstermektedir. Çizelgede verilen toplam eğitim ve test süresi, eğitim verilerinin özellik çıkarımı ve sınıflandırması aşamalarında geçen toplam süreyi ifade etmektedir. Buna göre Alexnet mimarisinde katmanların daha az olması nedeni ile bu mimari ile yapılan sınıflandırmalar diğerlerine göre çok daha kısa sürede gerçekleşmiştir.

En yüksek doğrulluk ve dengeli doğruluk değeri bulunan Resnet101+Softmax ve Resnet50+DVM yöntemlerindeki sınıflandırma sonuçlarının karmaşıklık matrisleri Şekil 3'te verilmiştir.









	Ortalama Doğruluk (%)	Ortalama Dengeli Doğruluk (%)	Ortalama Eğitim ve Test Süresi (sn)
Softmax	92,97%	92,03%	385,04
DVM	91,61%	91,80%	6,17
KNN	88,55%	86,70%	5,20
Navie Bayes	84,70%	85,62%	6,36
Diskr. Analizi	91,95%	91,08%	6,94

Cizolas E. Supifiendum citalema become conucler

Temel ESA mimarilerinde Softmax sınıflandırıcının diğer sınıflandırıcılara göre yüksek doğruluklara sahip olduğu gözlenmiştir. Fakat aynı zamanda diğer sınıflandırıcılara göre eğitim ve test aşamasını daha fazla sürede gerçekleştirmiştir. Çizelge 5'de tüm sınıflandırıcıların ortalama başarım sonuçları verilmiştir. Tüm mimarilerde kullanılan Softmax sınıflandırıcılarının ortalama dengeli doğruluk değeri 92,03%'dir. Bu sonuca en yakın ortalama dengeli doğruluk değerleri 91,80% ile Destek Vektör Makineleri ve 91,08% ile Diskriminant Analizi sonucunda elde edilmiştir. DVM, KNN Navie Bayes ve Diskriminant Analizi sınıflandırıcılarının eğitim ve test süresi süreleri birbirlerine çok yakın olduğu gözlenmiş iken Softmax sınıflandırma ile eğitim ve test süresinin diğer sınıflandırma yöntemlerine göre çok daha fazla olduğu (385 sn) gözlenmiştir.

	Çizelge 6. ESA mimarilerinin ortalama başarım sonuçları.					
	Ortalama Doğruluk	Ortalama Dengeli Doğruluk	Ortalama Eğitim ve Test Süresi			
	(%)	(%)	(sn)			
Alexnet	89,05%	88,07%	14,39			
ResNet18	90,00%	89,66%	15,44			
ResNet50	91,90%	92,02%	47,68			
ResNet101	89,52%	89,03%	51,13			
Inceptionv3	89,52%	88,74%	83,29			
Googlenet	89,52%	88,73%	45,00			
DenseNet201	90.16%	89.87%	316.67			

Çizelge 6'da tüm mimarilerin ortalama başarım sonuçları verilmiştir. Genel olarak tüm sınıflandırıcılar ile sınıflandırma başarımına bakıldığında en başarılı mimari 91,90% ortalama doğruluk ve 92,02% ortalama dengeli doğruluk değeri ile Resnet50 mimarisidir. Mimariler arasında en yavaş sonuca ulaşan mimari toplam katman sayısı ve derinlik bakımından en yüksek değerlere sahip Densenet201 mimarisidir.

4. Sonuçlar

Çalışmada farklı derin öğrenme modellerinin, termal görüntülerin çok sınıflı sınıflandırma performansları kıyaslanmıştır. Kullanılan veri seti ev, araba, insan ve hayvandan oluşan 4 sınıftan oluşmuştur. İlk olarak veri setindeki görüntülerin Alexnet, Googlenet, Resnet-18, Resnet-50, Resnet -101, Inceptionv3, Densenet201 mimarileri ile özellikleri çıkarılmıştır. Ardından Softmax, Destek Vektör Makineleri (DVM), K En Yakın Komşuluk (KNN), Navie Bayes ve Diskriminant Analizi yöntemleri ile sınıflandırma performansları ölçülmüştür. Performans ölçümleri çok sınıflı sınıflandırma performans metriklerine göre gerçekleştirilmiştir. Böylelikle ölçümlerde her sınıfa aynı ağırlığı verilmiş ve sınıf dağılımına duyarsızlık sağlanmıştır. Az veriye sahip yeterince temsil edilmeyen sınıfların da olası tahminlerde temsil edilmesi sağlanmıştır.

Deney sonuçları eşit ağırlıklı olmayan çok sınıflı termal verilerde ESA mimarilerinden Resnet50 mimarisinin daha başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Mimarilerde Softmax kullanımının başarımı arttırdığı fakat eğitim ve test süresini diğer sınıflandırma yöntemlerine göre 60 kat daha fazla sürede gerçekleştirdiği görülmüştür. Ayrıca sınıflardaki veriler dengesiz olsa da kurulan derin öğrenme modellerinin hem doğru pozitif değerlerini hem de doğru negatif değerlerinin iyi tahmin edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Bu çalışma ESA mimarilerinde ağırlıkların güncellenmesiyle Softmax sınıflandırması kullanılarak gerçekleştirilen eğitim süreçlerinin, işlem süresi ve hesaplama kaynakları açısından oldukça maliyetli olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, önceden eğitilmiş ESA ağlarından özellik çıkarımı yapılarak makine öğrenimi sınıflandırıcılarının kullanılması durumunda, özellikle ResNet-50 mimarisi ile tamamen eğitilmiş bir ağın doğruluğu ile aynı performans elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu bulgu, küçük ve dengesiz verisetlerinde, önceden eğitilmiş ağların kullanımının zaman ve kaynak tasarrufu sağlayan etkili bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

Kaynaklar

- [1] Aslan S. Mühendislik uygulamalarında termal kamera kullanımı. Yüksek lisans tezi. Hatay: İskenderun Teknik Üniversitesi; 2016.
- [2] Cho Y, Bianchi-Berthouze N, Marquardt N, Julier SJ. Deep thermal imaging. In: Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, New York, NY, USA; 2018. p. 1– 13. doi: 10.1145/3173574.3173576.
- [3] Al-Obaidy F, Yazdani F, Mohammadi FA. Fault detection using thermal image based on soft computing methods: Comparative study. Microelectronics Reliability 2017;71:56–64. doi: 10.1016/j.microrel.2017.02.013.
- [4] Sarawade AA, Charniya NN. Detection of faulty integrated circuits in PCB with thermal image processing. In: 2019 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), IEEE; 2019. p. 1–6. doi: 10.1109/ICNTE44896.2019.8946061.
- [5] Jiang A, Noguchi R, Ahamed T. Tree trunk recognition in orchard autonomous operations under different light conditions using a thermal camera and Faster R-CNN. Sensors 2022;22(5). doi: 10.3390/s22052065.
- [6] Memari M, Shekaramiz M, Masoum MAS, Seibi AC. Data fusion and ensemble learning for advanced anomaly detection using multi-spectral RGB and thermal imaging of small wind turbine blades. Energies (Basel) 2024;17(3). doi: 10.3390/en17030673.
- [7] Roslidar R, et al. A review on recent progress in thermal imaging and deep learning approaches for breast cancer detection. IEEE Access 2020;8:116176–116194. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3004056.
- [8] Bauer J, Mazurkiewicz J. Neural network and optical correlators for infrared imaging based face recognition. In: 5th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA'05), IEEE; 2005. p. 234–238. doi: 10.1109/ISDA.2005.70.
- [9] Yoshitomi Y, Miyawaki N, Tomita S, Kimura S. Facial expression recognition using thermal image processing and neural network. In: Proceedings 6th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (RO-MAN'97 SENDAI), IEEE; p. 380–385. doi: 10.1109/ROMAN.1997.647016.
- [10] Koukiou G, Anastassopoulos V. Drunk person identification using thermal infrared images. International Journal of Electronic Security and Digital Forensics 2012;4(4). doi: 10.1504/IJESDF.2012.049747.
- [11] Hou F, Zhang Y, Zhou Y, Zhang M, Lv B, Wu J. Review on infrared imaging technology. Sustainability 2022;14(18):11161. doi: 10.3390/su141811161.
- [12] Akula A, Ghosh R, Sardana HK, Predeep P, Thakur M, Varma MKR. Thermal imaging and its application in defence systems. In: AIP Conference Proceedings; 2011. p. 333–335. doi: 10.1063/1.3643540.
- [13] Kaya S, Leloglu UM. Buried and surface mine detection from thermal image time series. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens 2017;10(10):4544–4552. doi: 10.1109/JSTARS.2016.2639037.

- [14] Thnh NT, Sahli H, Ho DN. Finite-difference methods and validity of a thermal model for landmine detection with soil property estimation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2007;45(3):656–674. doi: 10.1109/TGRS.2006.888862.
- [15] Naga Priya CN, Ashok SD, Maji B, Kumaran KS. Deep learning based thermal image processing approach for detection of buried objects and mines. Engineering Journal 2021;25(3):61–67. doi: 10.4186/ej.2021.25.3.61.
- [16] d'Acremont A, Fablet R, Baussard A, Quin G. CNN-based target recognition and identification for infrared imaging in defense systems. Sensors 2019;19(9):2040. doi: 10.3390/s19092040.
- [17] Canziani A, Paszke A, Culurciello E. An analysis of deep neural network models for practical applications. May 2016.
- [18] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Commun ACM 2017;60(6):84–90. doi: 10.1145/3065386.
- [19] Lin M, Chen Q, Yan S. Network in network. Dec. 2013.
- [20] Paszke A, Chaurasia A, Kim S, Culurciello E. ENet: A deep neural network architecture for realtime semantic segmentation. Jun. 2016.
- [21] Szegedy C, et al. Going deeper with convolutions. Sep. 2014.
- [22] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. Sep. 2014.
- [23] He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Deep residual learning for image recognition. Dec. 2015.
- [24] Szegedy C, Vanhoucke V, Ioffe S, Shlens J, Wojna Z. Rethinking the inception architecture for computer vision. Dec. 2015.
- [25] Szegedy C, Ioffe S, Vanhoucke V, Alemi A. Inception-v4, Inception-ResNet and the impact of residual connections on learning. Feb. 2016.
- [26] visible_thermal. Kaggle. Available from: https://www.kaggle.com/datasets/nikhilrajput1112/visible-thermal
- [27] HIT-UAV: A high-altitude infrared thermal dataset. Kaggle. Available from: https://www.kaggle.com/datasets/pandrii000/hituav-a-highaltitude-infrared-thermal-dataset
- [28] Thermal mannequin fall image dataset. Kaggle. Available from: https://www.kaggle.com/datasets/ivannikolov/thermal-mannequin-fall-image-dataset
- [29] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks. Mach Learn 1995;20(3). doi: 10.1023/A:1022627411411.
- [30] Cover TM, Hart PE. Nearest neighbor pattern classification. IEEE Trans Inf Theory 1967;13(1). doi: 10.1109/TIT.1967.1053964.
- [31] Clarke MRB, Duda RO, Hart PE. Pattern classification and scene analysis. J R Stat Soc Ser A 1974;137(3). doi: 10.2307/2344977.
- [32] Fisher RA. The use of multiple measurements in taxonomic problems. Ann Eugen 1936;7(2). doi: 10.1111/j.1469-1809.1936.tb02137.x.
- [33] Huang G, Liu Z, van der Maaten L, Weinberger KQ. Densely connected convolutional networks. Aug. 2016.
- [34] Tharwat A. Classification assessment methods. Applied Computing and Informatics 2021;17(1):168–192. doi: 10.1016/j.aci.2018.08.003.
- [35] Grandini M, Bagli E, Visani G. Metrics for multi-class classification: an overview. Aug. 2020.
- [36] Aslan E. LSTM-ESA hibrit modeli ile MR görüntülerinden beyin tümörünün sınıflandırılması. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2024;11(22):63–81. doi: 10.54365/adyumbd.1391157.
- [37] Takahashi K, Yamamoto K, Kuchiba A, Koyama T. Confidence interval for micro-averaged F1 and macro-averaged F1 scores. Applied Intelligence 2022;52(5):4961–4972. doi: 10.1007/s10489-021-02635-5.



Adıyaman University Journal of Engineering Sciences Adyü J Eng Sci 2025;12(25):72-92

Adya J Eng Sci 2025;12(25):72-92 Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Adyü Müh Bil Derg 2025;12(25):72-92

https://doi.org/10.54365/adyumbd.1583220

Research Article / Araştırma Makalesi

Atık Kâğıt ve Aktif Orijinli Genleşmiş Perlit İçeren Hafif Yapı Elemanları Üzerine Bir İnceleme

A Study on Lightweight Building Elements Containing Waste Paper and Active Origin Expanded Perlite

Lütfullah Gündüz¹, Şevket Onur Kalkan^{1*}

¹ İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir Türkiye

Öz Küresel ısınma, inşaat sektörü dahil olmak üzere tüm sektörleri yakından etkileyen önemli bir konudur. Bu nedenle, düşük enerji tüketimiyle üretilebilen malzemeler geliştirmek için birçok girişim gerçekleştirilmektedir. Bunlardan bir tanesi atık kağıtların yapı malzemeleri üretiminde kullanımı olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, binalarda ısı yalıtımı açısından boşluklu hafif kagir beton blokların kullanımı da son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır. Bu makalede, geri dönüştürülmüş atık kâğıt ve aktif orijinli genleşmiş perlit ve pomzanın dolgu duvar yapımında kullanılan hibrit agregalı sürdürülebilir yapı elemanlarının incelenmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada, hafif yapı malzemesi üretiminde çevre dostu ve sürdürülebilir alternatifler oluşturmak için atık kâğıt, pomza ve perlit kullanılarak elde edilen kagir blokların mekanik özellikleri, yoğunluk yalıtımı ve 151 acısından performansı değerlendirilmiştir. Atık kâğıt gibi geri dönüştürülmüş malzemelerle geleneksel yapı malzemelerine kıyasla daha düşük maliyetli, çevreye duyarlı ve enerji verimliliği sağlayan yapı elemanlarının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, atık kâğıt kullanımının artışı ile malzemenin basınç dayanımı düşse de RILEM'e göre gerekli basınç dayanım kıstasını sağlayabildiği gözlemlenmiştir. Küp örneklerinin 28 gün kür sonrası basınç dayanım değerleri 2,76 MPa - 3,38 MPa aralığında belirlenmiştir. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımının kagir bloğun birim ağırlıklarında 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında sırasıyla %16,4, %15,2, %14,4 ve %13,8'lik hafiflemesini sağlamıştır. Ayrıca, %35 atık kâğıt kullanımı ile hafif bloklarda 0,143 ile 0,167 W/mK ısı iletkenlik katsayısı değerlerinin sağlanabildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma, hibrit agregalı yapı elemanlarının inşaat sektöründe hafif dolgu duvarlar için potansiyel bir alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Global warming is an important issue that closely affects all sectors, including the construction sector. For this reason, many initiatives are being carried out to develop materials that can be produced with low energy consumption. One of these can be considered as the use of waste paper in the production of building materials. In addition, the use of hollow lightweight masonry concrete blocks in terms of thermal insulation in buildings has also become quite widespread in recent years. This article aims to examine sustainable building elements with hybrid aggregates used in the construction of infill walls made of recycled waste paper and active origin expanded perlite and pumice. In the study, the mechanical properties, density and thermal insulation performance of the masonry blocks obtained using waste paper, pumice and perlite were evaluated in order to create environmentally friendly and sustainable alternatives in the production of lightweight building materials. It is aimed to develop building elements that are more cost-effective, environmentally friendly and energy efficient compared to traditional building materials with recycled materials such as waste paper. According to the results obtained, although the compressive strength of the material decreases with the increase in the use of waste paper, it has been observed that it can meet the required compressive strength criteria according to RILEM. Compressive strength values of cube samples after 28 days of curing were determined in the range of 2.76 MPa - 3.38 MPa. The use of 20% waste paper and 15% expanded perlite provided a 16.4%, 15.2%, 14.4% and 13.8% reduction in the unit weight of the masonry block in 110, 150, 180 and 200 doses of binder, respectively. In addition, it was observed that thermal conductivity coefficient values of 0.143 to 0.167 W/mK could be achieved in lightweight blocks with the use of 35% waste paper. This study shows that hybrid aggregate structural elements can be used as a potential alternative for lightweight infill walls in the construction sector.

Abstract

Anahtar Kelimeler:Atik kağıt, perlit, kâgir blok, hafif beton,
dayanım, rötre, yalıtımKeywords: Waste paper, perlite, masonry block, lightweight concrete,
strength, shrinkage, insulation

^{*} Sorumlu yazar e-posta (Corresponding e-mail): <u>sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr</u> **Geliş Tarihi (Received):**11.10.2024, **Kabul Tarihi (Accepted):** 18.03.2025

1. Giriş

Günümüzde artan çevresel endişelerin esas kaynağı, yeterince ekonomik olarak değerlendirilemeyen ve yönetilemeyen atıkların giderek birikmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu atıkların yoğun miktarlarda herhangi bir endüstri alanında katma değer sağlayan birer geri dönüşüm materyali olarak kullanım olasılıklarının araştırılması, günümüzün önemli konuları arasında yer almaktadır. Bu malzemelerin miktar olarak yoğun tüketiminin söz konusu olabileceği özellikle inşaat malzemeleri olarak geri dönüştürülmesi, olası çevresel kirliliğin etkilerinin giderimi, binalarda sürdürülebilir ve ekonomik değerlere sahip yenilikçi malzemelerin geliştirilmesi için pratik yaklaşımlar olarak görülebilmektedir. Son yıllarda, yenilenebilir veya geri dönüştürülmüş malzemelerden üretilen farklı formlardaki yapı malzemelerine olan ilgi giderek önem kazanmaktadır. İnşaat sektöründe oldukça fazla miktarlarda yenilenemeyen kaynak kullandığından, düşük maliyetli ve yalıtım özellikleri olan geri dönüşüm malzemelerinin kullanımıyla yeni nesil sürdürülebilir nitelikte kompozit yapı elemanlarının üretilme potansiyeli, güncel araştırma konuları arasında yerini almıştır [1]. Yapı malzeme üretimlerinde geri dönüşüm materyal olasılıklarından birisi de atık kâğıtların hafif yapı elemanı üretimlerinde ana ve/veya katkı malzemesi olarak kullanılmasıdır. Birçok araştırmacının düşük yoğunluklu duvar tuğlaları geliştirmek amacıyla atık kâğıt, atık kâğıt çamuru, kül, granüle yüksek fırın cürufu, saman balyası, uçucu kül, strafor, geri dönüstürülmüş agregalar, plastik kutular, tarım atıkları üzerinde çalışmaları olduğu görülmektedir [2-11]. Geri dönüştürülebilir malzemeler arasında cam, kâğıt, karton, metal, plastik, lastik, tekstil ürünleri ve elektronikler bulunur. Gıda veya bahçe atığı gibi biyolojik olarak parçalanabilir atıkların kompostlanması veya başka şekilde yeniden kullanımı da bir geri dönüşüm biçimidir. Geri dönüşüm, insanlık tarihinin çoğunda yaygın bir uygulama olmuş ve tarihsel süreçte MÖ dördüncü yüzyılda Platon'a kadar uzandığı görülmektedir [12]. Atık kâğıtlar, özellikle çimento esaslı matrislerde geçişten günümüze değin farklı formlarda yapı malzemesi olarak kullanılmış olup, üretilen kompozit yapı elemanlarının basınç, çekme, eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla çok sayıda araştırma yapılmıştır [1-3,6-7,9-10,12]. Ancak, atık kağıtların boşluklu hafif kagir beton blokların üretiminde kullanılabilirliği ile ilgili literatürde sınırlı sayıda araştırma sonuçlarına rastlanmaktadır. Yousoff ve ark. [13] beton blokta kum yerine geri dönüştürülmüş kâğıt çamuru kullanımının fiziksel özelliklere etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında kullanılan geri dönüştürülmüş kâğıt çamuru yüzdeleri %5, %10 ve %15'tir. %5 geri dönüştürülmüş kâğıt çamuru kullanımı, %12,24 su emme oranı, 0,25 W/m°C (1,17 W/mK) ısıl iletkenlik değeri ve 2457,71 kg/m3 yoğunluk değeri ile beton blokta en etkili oran olarak tespit edilmiştir. Yapılan testlerden elde edilen veriler ışığında, geri dönüştürülmüş kâğıt çamurunun beton bloklarda kullanılmasının inşaatlarda iç bölme duvar, boşluklu dış duvarların iç ve dış bölmeleri, döşeme dolgusu olarak kullanılabilecek iyi bir yan ürün malzemesi olabileceği, çevre dostu ve sürdürülebilir olduğu sonucuna varmışlardır. Akinwumi ve ark. [14] bir yapı malzemesi olarak kullanılmaya uygunluğunu belirlemek için atık gazete ve ofis kâğıdı kullanılarak üretilen betonun yoğunluğunu, su emme kapasitesini, basınç dayanımını ve yangına dayanıklılığını belirlemişlerdir. İncelenen her karışım oranı için, gazete kullanılarak betonun yığın yoğunluğu, su emme, basınç dayanımı ve yangına dayanıklılığının ofis kâğıdı kullanılarak üretilen daha yüksek olduğu bulunmuştur. Kâğıt katkılı betonun su emme ve yangına dayanıklılığının yüksek olduğu ve atık kâğıt içeriği arttıkça arttığı, kağıt katkılı betonun yığın yoğunluğu ve basınç dayanımının ise düşük olduğu ve atık kağıt içeriği arttıkça azaldığı bulunmuştur. Kâğıt betonun, özellikle yüksek katlı binaların bölme duvarlarını yapmak için kullanılacak hafif ve yangına dayanıklı içi boş veya dolu blokların üretimi için etkili ve sürdürülebilir bir malzeme olduğu önerilmiştir. Solahuddin ve Yahaya [15] atık kâğıdı (WP), Parçalanmış Fotokopi Atık Kağıdı (SCPWP) ve Parçalanmış Karton Atık Kağıdı (SCBWP) olmak üzere iki tür Parçalanmış Atık Kağıdın (SWP) katkı maddeleri olarak betonun özellikleri ve Betonarme Kirişin (RCB) yapısal davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için kullanmışlardır. Slump, basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımları, referans örneğine kıyasla %5-10 SCPWP ilavesi için %4-13 artarken, %15 SCPWP ilavesi için %16-23 azalmıştır. SCBWP için slump, basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımları, referansa kıyasla %5-10 ekleme için %10-23 artarken, %15 ekleme için %15-21 azalmıştır. %15 SCPWP ve SCBWP ilavesi su emme ve çiçeklenmede en yüksek etkiyi göstermiştir ve %15 SCBWP ve SCPWP ilavesiyle sırasıyla %11 ve %10,28 artış gözlemlemişlerdir.

Gözenekli hafif agregalardan mamul boşluklu geometrik tasarımlara sahip kâgir duvar blokları dünya genelinde inşaat projelerinde yaygın olarak kullanılan çok yönlü yapı malzemeleridir [16]. Bu kâgir bloklar, birim ağırlıklarını azaltan ve yalıtım özelliklerini iyileştiren özel tasarım boşluk geometrilerine ve konfigürasyonlara sahiptirler [17]. Bununla birlikte blok elemanını oluşturan hafif harç bileşiminde gerek birim ağırlığı azaltıcı gerekse yalıtım değerini geliştirici etki sergileyen farklı tane boyutlarında gözenekli agregalar da kullanılmaktadır [17]. Bu agregalar arasında yaygın şekilde pomza taşı, volkan cürufları, ignimbrit agregalar görülebildiği gibi, genleşmiş perlit, vermikülit, diyatomit gibi agregaları da görmek mümkündür [18-20]. Bununla birlikte bu blok elemanların üretimlerinde endüstriyel artık malzeme hüviyetinde nitelenebilen birçok malzeme de geri dönüşüm agregaları olarak kullanılarak, yapı elemanının teknik performansları iyileştirilebilmektedir. Hafif kâgir bloklar inşaat endüstrisinde taşıyıcı olmayan iç ve dış bölme duvarlar gibi çeşitli uygulamalar için ideal birer yapı bileşeni özelliklerini taşımaktadırlar [16-20]. Bu bağlamda, atık kâğıdın hafif yapı elemanı kâgir duvar elemanlarında kullanılması ayrıca, çöp sahalarına, yakma tesislerine veya diğer kullanım seçeneklerine ekonomik ve karlı birer alternatif de olabilir.

Perlit de pomza gibi volkanik kökenli bir kayaç yapısına sahiptir. Kayacın bünyesinde oluşum mekanizmasına göre farklı oranlarda kristal suyu bulunur. Bu kristal suyun kayaç bünyesindeki miktarı, sıcaklık etkisine maruz kalan perlitin genleşme oranına etkiyen en belirgin faktördür. Perlitler oluşumları ve bünyesindeki kristal su miktarlarına göre *aktif perlit* ve *pasif perlit* olarak tanımlanabilmektedir. Aktif perlitlerin bünyesinde kristal su miktarı yüksek olup, düşük sıcaklık değerlerinde büyük hacim artışı oluşturarak genleşme karakteristiği gösterirler. Pasif perlitler de ise, kristal su miktarı daha düşük düzeyde olup, ancak yüksek sıcaklık değerlerinde genleşebilirler [21-23]. Aktif perlit özellikli malzemeler, düşük sıcaklık etkisinde genleşme miktarı ayarlanarak (3-10 kat arası) tane mukavemeti ve yoğunluğu görece yüksek genleştirilmiş agrega üretiminin yapılabilmesine de olanak sağlayabilmektedir. Bu perlitlerin genleşme işlemi sonrası yığın yoğunlukları 150–300 kg/m³ aralığında değişim gösterebilmektedir. Bu şekilde elde edilen genleştirilmiş perlit agregalara "*düşük sıcaklıkta genleşmiş perlit*" adı da verilebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, atık kâğıt ve genleşmiş perlitin etkili ve kaliteli bir hafif kâgir blok elemanı üretiminde kullanılmasına odaklanmaktır. Literatür incelendiğinde, atık kâğıt ve perlit agregaların birlikte kullanılması ile üretilen hafif beton örneklerinin teknik analizlerini inceleyen yeterli düzeyde çalışma olmadığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmada, hafif beton karışımında atık kâğıdın betonun dayanımına etkisinin incelenmesi ve atık kâğıt içeren beton için karışım oranlarının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışma ile evlerde, okullarda, ticari, endüstriyel ve diğer kuruluşlarda üretilen atık kâğıtların geri dönüşümü ve tekrar endüstriyel bir alana ekonomik olarak kazandırılması amaçlanmıştır. Ayrıca, atık kâğıtların olası çöp toplama alanlarında birikimiyle potansiyel oluşturabileceği kirliliğin çevre üzerindeki etkisini azaltmak ve ekonomik katma değeri olan bir materyal özelliği kazandırmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Test Örneklerinde Kullanılan Malzemeler

Taşıyıcı özellikte olmayan ve dolgu duvar amacıyla kullanılacak hafif yapı elemanı kâgir blok elemanlarının üretiminde gözenekli ve doğal orijinli birden fazla tür hafif agregalar sektörel uygulamalarda kullanıla gelmektedir. Bunlar arasında en yaygın olanları arasında pomza, volkan cürufu, tüfit ve ignimbrit kayaçları gibi doğal malzemeler yer almaktadır. Bu kayaçların ortak özelliği volkanik orijinli olmalarının yanı sıra doğal şekilleriyle hafif yapı elemanı kâgir ürünlerin üretimlerinde kullanılabilir olmalarıdır [21,24-25]. Bu çalışma kapsamında kâgir blok elemanların üretimi amacıyla test örneklerinin hazırlanmasında 3 farklı malzeme, ana agrega malzemeler olarak kullanılmıştır: *Pomza, geri dönüşüm ürünü atık kâğıt* ve genleşmiş perlit.

Pomza agrega malzeme Kayseri-Talas pomza ocaklarından doğal tüvenan formları korunarak tedarik edilmiş ve analizler için laboratuvar ortamına getirilmiştir. Pomza ocağından temin edilen agregalar, doğal nemlerini kaybetmemeleri için kilitli naylon poşetlerde saklanmıştır. Laboratuvarda, nemleri korunarak primer bir kırıcıda kırılan pomza agregalar, ardından kare göz açıklıklı elekler kullanılarak 0-1 mm ve 1-3 mm olmak üzere iki farklı tane boyut grubuna ayrılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Boyutlandırılmış pomza agrega örneklerinin genel görünümü

Bu çalışmada 0-1 mm boyut aralığındaki pomza agrega örnekleri "FPA", 1-3 mm boyut aralığındaki pomza agrega örnekleri ise "CPA" olarak kodlanmıştır. FBA ve CPA pomza agrega örneklerinin doğal nem içerikleri sırasıyla %10 ve %13 olup, nemli yığın yoğunlukları ise sırasıyla 630 kg/m³ ve 540 kg/m³'tür. Pomza agregalar çalışma boyunca herhangi bir kurutma işlemine tabi tutulmaksızın bu doğal nemleri ile kullanılmışlardır.

Bu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak bütün karışımlarda ASTM Tip I (42,5 MPa) özelliklerine sahip çimento tercih edilmiştir. Çimentonun kimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Çimento, pomza ve genleşmiş perlitin kimyasal içeriği Çizelge 1'de verilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan atık kâğıtlar geri dönüşüm ürünü olup, gazete parçaları, artık mukavva kutuları ve kıyılmış kâğıt atıkları toplanarak laboratuvar ortamında biriktirilmiştir. Sonrasında bu materyaller ayrı ayrı fiziksel bir parçalama işlemine tabi tutularak ince boyutlu şeritler ve partiküller şekline indirgenmiştir. Ufalanmış her bir materyal, daha sonra birbirleriyle harmanlanarak karıştırılmış ve ortalama %10'luk bir su ile parçalanmış tüm şerit ve partiküller, su içesinde bekletilerek hamur haline gelmesi sağlanmıştır. Daha sonra bu hamur kurutularak selülozik lifsel yapıda atık kâğıt partiküllerinin pekleşmesi sağlanmıştır. Bu şekilde kâğir blok üretimi için testlerde ana agrega olarak değerlendirilebilecek geri dönüşüm ürünü atık kâğıt malzemesi elde edilmiştir (Şekil 2). Kuruma işlemi tamamlanmış ve pekleşmiş formdaki atık kâğıt malzemesi yığınından alınan altı ayrı numune alınarak her birinin birim hacim kütle değerleri sabit hacimli bir ölçü kabı kullanılarak elektronik terazi yardımıyla ağırlıkları ölçülmüştür. Bu ölçümlerde malzeme birim ağırlığının ölçü kabı hacmine oranı olarak belirlenen altı ayrı numunenin yoğunluk değerlerinin aritmetik ortalaması alınmış olup, bu yoğunluk değeri malzemenin yığın yoğunluğu 080±25 kg/m³ olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Geri dönüşüm ürünü atık kâğıt görünümü

Bu çalışma kapsamında orijini aktif perlit özelliğinde olan bir perlit kayacının 630-650°C sıcaklık aralığında genleşmesiyle ortalama yığın yoğunluğu 180±20 kg/m³ olan genleşmiş perlit agrega piyasa koşullarından temin edilerek kullanılmıştır (Şekil 3). Genleşmiş perlit agreganın ortalama boyutu 0-2 mm aralığındadır.



Şekil 3. Genleşmiş perlit agrega sembolik genel görünümü

Bileşen (%)	– Çimento	Pomza	Genleşmiş Perlit
SiO ₂	20,66	68,76	74,4
Al ₂ O ₃	5,89	14,21	18,9
Fe ₂ O ₃	4,12	3,57	0,7
CaO	63,16	2,33	1,8
Na ₂ O	0,17	3,79	3,4
K ₂ O	0,79	2,94	4,6
MgO	2,63	0,88	0,4
Kızdırma kaybı	1,41	1,64	0,87

Çizelge 1. Çimento, pomza ve perlitin bazı majör kimyasal bileşenleri.

2.2. Karışım Tasarımı ve Örnek Hazırlama

Atık kâğıt ve genleşmiş perlit agregaların kâgir blok üretiminde bir hafif beton bileşimi olarak kullanılacak özellikler taşıyıp taşımadığının analizi amacıyla, öncelikle bir dizi kuru karışım sıfır slump kıvamında hibrit agregalı hafif beton (HAHB) örnekleri hazırlanarak fiziksel ve mekanik analizleri yapılmıştır. Bu örneklerin tasarımında 3 farklı karışım kombinasyonu uygulanmıştır. Bunlar:

- I. Kontrol test örnekleri amacıyla, karışım bileşiminde atık kâğıt ve genleşmiş perlit içermeyen yalnızca pomza agrega kullanılarak tasarlanmış bir seri hafif beton örnekleri, (karışım bileşiminde yalnızca atık kâğıt ve genleşmiş perlit içeren kombinasyonlar, oluşturulan kuru karışım kıvamındaki harcın işlenebilirliğinin düşük olması sebebiyle bu çalışma kapsamında değerlendirmeye alınmamıştır).
- II. Karışım bileşiminde toplam agrega miktarının ağırlıkça %20'si atık kâğıt ve %15'i genleşmiş perlit agrega kullanılarak tasarlanmış bir seri hafif beton örnekleri,
- III. Karışım bileşiminde toplam agrega miktarının ağırlıkça %35'i atık kâğıt ve %15'i genleşmiş perlit agrega kullanılarak tasarlanmış bir seri hafif beton örnekleri.

II. ve III. seri karışım tasarımlarında atık kâğıt ve genleşmiş perlit miktarları, karışımdaki pomza agregaya ikame (yer değiştirmeli) olarak tasarlanmıştır. Bu serilerde hazırlanan test örneklerinin analizlerinden elde edilen bulgular bu çalışmanın ilk bölümünü teşkil etmekte olup, kâgir blok üretiminde kullanılacak kuru kıvam formundaki hafif beton harcı için ön bilgilerin elde edilmesini amaçlamaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde, ön analizlerde belirlenen karışım oranlarına uygun olarak, tam ölçekli, iki sıra boşluklu ve 6 gözlü boşluk geometrisi ile üretilen kagir blok formu için hibrit agregalı kagir blok (HAKB) numuneleri üzerinde basınç dayanını, birim ağırlık ve ısı iletkenlik analizleri gerçekleştirilmesi planlanmıştır.

I. seri HAHB karışım tasarımında toplam agreganın ağırlıkça %40'ı FPA ve %60'ı CPA oranlarında harmanlanmıştır. Harmanlanmış pomza agrega kullanılarak, sırasıyla 110, 150, 180 ve 200 kg/m³ çimento dozajlarında kuru karışım beton blok üretimini simüle etmek amacıyla, laboratuvar ortamında vibrasyonsıkıştırma ünitesine sahip bir döküm makinesi ile 100x100x100 mm boyutlarında küp numuneler ayrı ayrı üretilmiştir. Bu örnekler çalışmada HB1 - BH4 olarak kodlanmıştır. Bu örneklerin analiz bulguları çalışma kapsamında kontrol değerleri olarak irdelenmiştir. II. seri HAHB karışım tasarımında toplam agreganın ağırlıkça %15 FPA, %50 CPA, %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit oranlarında harmanlanmıştır. Benzer şekilde III. seri HAHB karışım tasarımında da toplam agreganın ağırlıkça %15 FPA, %35 CPA, %35 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit oranlarında harmanlanmıştır. II. ve III. seri karışımlarından da I. seride hazırlanan örneklere eşdeğer olan, sırasıyla dört farklı 110, 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlarında çimento kullanılarak kuru karışım kıvamında küp örneklerin dökümleri yapılmıştır. II. seri tasarımlarına ait örnekler çalışmada HB5 - BH8 ve III. seri tasarımlarına ait örnekler de HB9 - BH12 olarak kodlanmıştır. I., II. ve III. seri tasarımların bileşenleri ve elde edilen harç yoğunluk değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Her bir karışım için 12 adet küp numune dökümü gerçekleştirilmiş ve dört farklı çimento dozajı kullanılarak her seride toplam 48 adet HAHB numunesi üretilmiştir. Bu bağlamda çalışma kapsamında üç ayrı toplamda 144 test örneği hazırlanmıştır.

Kod	Çiment o	FPA	СРА	Atık Kâğıt	Genleşmi ş Perlit	Agrega/ Çiment o Oranı	Taze Beton Yoğunluğu	Sertleşmi ş Beton Yoğunluk
	(kg/m³)	(kg/m³)	(kg/m ³)	(kg/m³)	(kg/m³)	(A/Ç)	(kg/m³)	(kg/m³)
HB 1	110	242	320	0	0	5,11	953	908
HB 2	150	231	305	0	0	3,57	982	925
HB 3	180	222	294	0	0	2,87	1003	939
HB 4	200	217	287	0	0	2,52	1016	951
HB 5	110	91	276	49	23	4,00	804	721
HB 6	150	86	262	46	22	2,78	843	747
HB 7	180	83	252	45	21	2,23	871	767
HB 8	200	81	246	43	21	1,96	888	782
HB 9	110	91	193	85	23	3,57	747	661
HB 10	150	86	183	81	22	2,48	790	690
HB 11	180	83	176	78	21	1,99	821	712
HB 12	200	81	171	75	21	1,74	842	727

Çizelge 2. Hibrit agregalı karışım oranları ve HAHB yoğunlukları

Çalışma kapsamında tasarlanan BH5 – HB8 karışımlarında atık kâğıt ve genleşmiş perlit agregaların harmanlanarak karışımlara ilave edilmesiyle kontrol amaçlı hazırlanan örneklere kıyasla hafif betonun ne ölçekte fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi olduğunu incelemek amaçlanmıştır. Bununla birlikte, BH9 – HB12 karışımlarında ise karışım tasarımında genleşmiş perlit miktarı sabit tutulup, atık kâğıt miktarı ağırlıkça %15 nispetinde artırıldığında hafif betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinde ne gibi değişime sebep olduğunu incelemek amaçlanmıştır. Bu bağlamda HB1 – HB4 karışımlarında Agrega/Çimento (A/Ç) oranları 2,52 –5,11, HB5 – HB8 karışımlarında Agrega/Çimento (A/Ç) oranları 1,96 –4,00 ve HB9 – HB12 karışımlarında Agrega/Çimento (A/Ç) oranları 1,74 –3,57 aralıklarında değişim göstermektedir. Bununla birlikte HAHB örneklerinin hazırlanmasında HB1 – HB4 karışımlarında Su/Çimento (S/Ç) oranları 0,24 – 0,30 aralığında, HB5 – HB8 karışımlarında Su/Çimento (S/Ç) oranları 0,28 – 0,34 aralığında ve HB9 – HB12 karışımlarında Su/Çimento (S/Ç) oranları ise 0,31 – 0,35 aralığında değişim göstermiştir.

Çalışma kapsamında, üç farklı seri karışım tasarımı için vibrasyon-sıkıştırma özelliğinde olan, manuel kullanımda %45 yerleştirme oranına kadar presleme yükü uygulanabilen bir döküm makinesi kullanılarak 100x100x100 mm boyutlarında HAHB küp numuneler üretilmiştir (Şekil 4). Dökümü yapılan HAHB test numuneleri, dolum, vibrasyon ve yerleştirme işlemlerinin ardından presleme aşaması tamamlanır tamamlanmaz kalıptan çıkarılarak laboratuvar ortamındaki normal hava koşullarında 28 gün süreyle kür işlemine bırakılmıştır. Kuru karışım kıvamında hazırlanan bu küp numuneler, HAKB elemanlarının üretiminde kullanılacak hafif harcın fiziksel ve mekanik özelliklerini ön analizler ile tespit etmek için değerlendirilmiştir. Laboratuvar ortamında prizini almış tüm küp test örnekleri, herhangi bir kurutma ve/veya başlıklama vs. işlemine tabi tutulmaksızın birim hacim kütle değerleri ölçülmüş ve mekanik dayanım testleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular, karışımlarda yer alan atık kâğıt ve genleşmiş perlit miktarları açısından kontrol örneklerinin değerleriyle karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.



Şekil 4. Analizlerde kullanılan HAHB tasarımının genel görünümü

Çalışma kapsamında ayrıca atık kâğıt kullanımının yüksek lifsel ve selülozik özellik sergilemesi ve genleşmiş perlit agregaların yüksek su emme kabiliyetlerinin olması düşüncesiyle HAHB test örneklerinin kuruma büzülmesi ve rutubet genleşmesi özelliklerindeki değişim önem kazanabilmektedir. Bu değişimin boyutlarını analiz edebilmek için, HAHB karışımları ayrı bir numune boyutu olarak 10x10x40 cm prizma formunda hazırlanmıştır. Kür işlemi tamamlanan bu boyuttaki HAHB numunelerinin kuruma büzülmesi (rötresi) ve rutubet genleşmesi özellikleri, ASTM C426 standardına uygun olarak test edilerek belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, ön analizlerde belirlenen karışım oranları kullanılarak, tam ölçekli, iki sıra boşluklu ve 6 gözlü boşluk geometrisinde bulunan kagir blok formu için HAKB modeli üzerinde fiziksel ve mekanik analizler gerçekleştirilmesi planlanmıştır. HAHB test örneklerinin analizlerinden elde edilen bulgular bağlamında, atık kağıt ve genleşmiş perlit agregaların birlikte harmanlanarak kagir blok üretiminde kullanılabilme potansiyelinin irdelenmesi amacıyla, taşıyıcı olmayan özellikte duvar dolgu blok elemanı olarak değerlendirilebilecek sektörel örgü duvar uygulamalarında kullanılabilen bir geometriye sahip kagir blok formu için HAKB modeli üzerinde performans analizlerinin yapılması tasarlanarak, her bir seri için ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Bu analizlerde HAKB prototip modeli 135 x 390 x 185 mm (genişlik x uzunluk x yükseklik) anma boyutlarında olup, geometrik olarak iki sıra boşluklu, 6 gözlü ve lamba zıvanalı (kenetlenmeli) formundadır. Bu tasarım, projelerde çoğunlukla iç bölme duvarların oluşturulmasında tercihen kullanılan bir blok formu olup, odalar arası yalıtım performansının geliştirilmesinde önem kazanmaktadır. Analizlerde kullanılan HAKB tasarımının genel görünümü sembolik olarak Şekil 5'te gösterilmiştir. Kâgir blok analizlerinde, TS EN 771-3 ve ilgili standartların belirlediği prensipler temel alınmıştır.



Şekil 5. Analizlerde kullanılan HAKB tasarımının sembolik genel görünümü

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında test edilen tüm HAHB küp numunelerinin su emme değerleri, rutubet genleşmesi, kuruma büzülmesi ve basınç dayanımı, her bir seri karışım tasarımı için sırasıyla Çizelge 3'te sunulmuştur. Ayrıca, HAHB karışım bileşimleri için tam ölçekli HAKB elemanlarının birim hacim kütlesi, kuru birim ağırlığı, ısıl iletkenlik değerleri ve basınç dayanımı her bir seri karışım tasarımı için sırasıyla Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelgelerde verilen değerler, aşağıdaki alt bölümlerde detaylı karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

Kod	Agrega/ Çimento Oranı	Kütlece Su Emme Oranı	Basınç Dayanımı	Kuruma Büzülmes i	Rutubet Genleşmesi
_	(A/Ç)	(%)	(MPa)	(%)	(%)
HB 1	5,11	23,20	2,76	0,049	0,053
HB 2	3,57	17,90	2,82	0,050	0,051
HB 3	2,87	14,70	3,22	0,058	0,048
HB 4	2,52	11,08	3,38	0,059	0,044
HB 5	4,00	37,00	1,64	0,042	0,057
HB 6	2,78	31,80	1,97	0,046	0,053
HB 7	2,23	31,42	2,08	0,053	0,051
HB 8	1,96	25,70	2,34	0,054	0,047
HB 9	3,57	42,00	1,43	0,034	0,063
HB 10	2,48	39,84	1,62	0,044	0,058
HB 11	1,99	38,40	1,71	0,050	0,055
HB 12	1,74	37,30	1,88	0,052	0,052

Çizelge 3. HAHB karışımlarına ait test örneklerinin özellikleri

	Çizelge 4 . HA	AKB elemanlar	ina ait tasarım	ların özellikle	eri
Karışım	Agrega/ Çimento Oranı	Birim Ağırlık	Brüt Birim Hacim Kütle	Basınç Dayanımı	Isıl İletkenlik Değeri
	(A/Ç)	(kg)	(kg/m³)	(MPa)	(W/mK)
HB 1	5,11	5,68	583	1,77	0,203
HB 2	3,57	5,84	600	1,81	0,207
HB 3	2,87	5,96	612	2,06	0,210
HB 4	2,52	6,05	621	2,17	0,212
HB 5	4,00	4,75	488	1,05	0,176
HB 6	2,78	4,95	508	1,26	0,180
HB 7	2,23	5,11	525	1,33	0,183
HB 8	1,96	5,21	536	1,50	0,186
HB 9	3,57	4,39	451	0,92	0,147
HB 10	2,48	4,61	473	1,04	0,156
HB 11	1,99	4,78	491	1,10	0,161
HB 12	1,74	4,89	502	1,21	0,163

3.1. Küp Örneklerinin Analizi

3.1.1. Basınç Dayanımı ve Yoğunluk

Hafif beton tasarımlarında çimento dozajı arttıkça sertleşmiş beton örneklerinin artan yoğunluk değerlerine bağlı olarak basınç dayanım değerlerinin de artış eğilimi göstermesi olağan bir beklentidir. HAHB küp örneklerinin 28 gün kür sonrası basınç dayanım değerleri Şekil 6'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Çalışmada kontrol örnekleri amacıyla atık kâğıt ve genleşmiş perlit kullanılmadan tasarlanan HAHB küp örneklerinin 28 gün kür sonrası basınç dayanım değerleri 2,76 MPa – 3,38 MPa aralığında belirlenmiştir. Bu değişim çimento dozajına bağlı olarak gelişim göstermekte olup, 110 doz çimentodan 200 doz çimentoya artırıldığında HAHB küp örneklerindeki dayanım artışı yaklaşık %22,5'tir. Literatür ile yapılan çalışma sonuçları karşılaştırıldığında, yalnızca pomza agrega kullanılarak burada elde edilen değerler, benzer agrega yoğunluklarına sahip farklı pomza agregalarla yapılan hafif beton küp örneklerinin değerleriyle örtüştüğü de görülmektedir [26].



Şekil 6. HAHB küp örneklerinin çimento dozajına bağlı basınç dayanım değerleri

Hafif beton bileşiminde atık kâğıdın agrega olarak kullanımı, kâğıt malzemenin selülozik yapısı ve ayrıca lifsel bir form göstermesi sebebiyle beton dayanımının düşmesini etkileyen bir faktör olarak görülebilmektedir. Literatürde de atık kâğıt kullanımının %10-15 oranından fazla kullanımının basınç dayanımlarında düşüşe sebebiyet verdiği gözlemlenmektedir [15,27]. Ayrıca, bu çalışmada, genleşmiş agrega malzemenin de tane mukavemetin pomza agregaya kıyasla daha düşük düzeyde olması da basınç dayanımını düşürücü bir etki sergileyeceği kaçınılmaz olmaktadır. Çalışma kapsamında karışım tasarımında toplam agreganın ağırlıkça %20 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin harmanlanarak kullanılmış olduğu HB4 – HB8 karışımlarında, basınç dayanım değerleri çimento dozajına bağlı olarak 1,64 MPa – 2,34 MPa aralığında değişim göstermiştir. Artan çimento dozajı, küp örneklerin basınç dayanımını da artırmış olup, daha kompakt bir form kazanmasına olanak sağlamıştır. Ancak, eşdeğer çimento dozajında hazırlanmış kontrol örneklerine göre daha düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Örneğin; 110 kg/m³ dozajlı HB1 ve HB5 kodlu örneklerin basınç dayanımları arasındaki değişim %40,6'dır. Benzer şekilde 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı test örneklerindeki dayanım düşüşü sırasıyla HB2 ve HB6 için %30,1, HB3 ve HB7 için %35,4 ve HB4 ve HB8 için ise %30,8'dir.

II. seri karışım tasarımında genleşmiş perlit miktarı sabit tutularak atık kâğıt miktarı %15 artışla ağırlıkça %35 oranında kullanılmıştır. Diğer bir değişle, bu serideki örneklerde atık kâğıt kullanımının daha yüksek oranda olma koşulu irdelenmiştir. Bu serideki test örneklerinde de beklenildiği gibi atık kâğıt oranının artışı belirgin bir düzede basınç dayanım düşüşüne sebep olmuştur. HB9 - HB12 karışımlarında, basınç dayanım değerleri çimento dozajına bağlı olarak 1,43 MPa - 1,88 MPa aralığında değişim göstermiştir. Eşdeğer çimento dozajında hazırlanmış kontrol örneklerine ve %20 atık kâğıt kullanımlı II. seri örneklerine göre daha da düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Örneğin 110 kg/m3 dozajlı HB1 ve HB9 kodlu örneklerin basınç dayanımları arasındaki değişim %48,2'dir. Benzer şekilde 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı test örneklerindeki dayanım düşüşü sırasıyla HB2 ve HB10 için %42,6, HB3 ve HB11 için %46,9 ve HB4 ve HB12 için ise %44,4'tür. Bununla birlikte karışımlarda %15'lik atık kâğıt miktarı artışı %7,6 – %13,6 oranında HAHB dayanımlarının azalmasına sebep olmuştur. Basınç dayanım değerlerinin iyileşmesine etken olan karışım tasarım parametreleri arasında karışımın A/Ç oranının önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Çalışma boyunca elde edilen tüm küp örneklerde, A/Ç oranı azaldıkça, HAHB test numunelerinin basınç dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek dayanım değerlerinin elde edilmesi arzu edilen kâgir HAKB elemanlarının üretiminde, A/Ç oranının düşük olması ve homojen agrega tane boyutu dağılımına sahip harmanlanmış hibrit agrega karışımının kullanılması önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Taşıyıcı olmayan duvar birimlerinde kullanılacak kâgir elemanlarda yüksek mukavemet değerleri aranmamaktadır. Bu ürünler genellikle yapısal olmayan ve ağırlıklı olarak yalıtım özellikli ve/veya bina yalıtımına katkı sağlamak amacıyla kullanılan kâgir elemanlar olarak nitelendirilebilmektedir. Bununla ilgili olarak literatürde özellikle RILEM [26,28] tarafından öngörülen hafif beton gereksinimleri ve öngörülen parametrik ölçütleri referans değerler olarak kabul edilebilmektedir. Hafif agregalı betonların dayanım değerleri baz alındığında, RILEM [28] tarafından üç farklı sınıf belirlenmiştir: Sınıf I "Yapısal betonlar", Sınıf II "Yapısal ve Yalıtım amaçlı betonlar" ve Sınıf III "Dolgu ve amaçlı yalıtım betonları". Bu gruplar içinde yapısal betonlar, genellikle taşıyıcı görev üstlenen ve yüksek mukavemet gerektiren hafif beton türlerini temsil etmektedir. Ayrıca, sertleşmiş hafif betonun basınç dayanımı, yoğunluk ve ısıl iletkenlik değerleri, bu sınıflandırma sisteminde temel parametreler olarak kabul edilmektedir [26,28]. Kabul edilen teknik değer limitleri ise Çizelge 6'da sunulmuştur.

Çizelge 5. Hafif agregalı beton gereksinimleri [28]					
Sınıf	Ι	II	III		
Hafif betonun amacı	Yapısal	Yapısal ve Yalıtım	Yalıtım		
Basınç Dayanımı (MPa)	> 15.0	> 3.5	> 0.5		
Etüv kurusu yoğunluk (kg/m³)	< 2000	tanımlanmamış	tanımlanmamış		
Isıl iletkenlik (W/mK)	-	< 0.75	< 0.30		

Çalışma kapsamında, HAHB test örneklerinden Sınıf I "yapısal beton" veya Sınıf II "yapısal ve yalıtım amaçlı beton" mukavemet değerlerini karşılayan olmamıştır. Ancak, tüm HAHB test örnekleri, Sınıf III "dolgu ve yalıtım amaçlı betonlar" için belirlenen mukavemet sınırlarını rahatlıkla karşılamaktadır. Diğer bir değişle, %20 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin ve ayrıca %35 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin ve ayrıca %35 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin harmanlanarak kullanılmış olduğu II. ve III. seri karışımların dayanım değerleri, RILEM değerlendirmelerine göre dolgu ve yalıtım amaçlı hafif betonlar için minimum olarak belirlenen 0,5 MPa'lık dayanım değerini sağladığı görülmüştür. HAHB örneklerinde atık kâğıt ve genleşmiş perlitin bir arada harmanlanarak agrega malzeme olarak kullanımı, her ne kadar dayanım azalmasına sebep olsa da yalıtım amaçlı kullanılabilecek hafif beton limitlerini sağlamakta ve bu karışım tasarımına sahip beton tasarıyla kagir blok üretiminin mümkün olabileceği öngörülebilmektedir.

Hafif beton uygulamalarında basınç dayanımına etki eden bir diğer faktör ise betonun birim hacim kütlesinin değişimidir. Beton yoğunluğu düştükçe dayanım değerinin düştüğü de çoğu araştırmalarda belirgin bir özelliktir. Bu bağlamda hafif betonun birim hacim kütlesi, beton tasarımındaki A/Ç oranının bir fonksiyonu olarak da görülebilmektedir. Çalışma kapsamından elde edilen hafif beton örneklerinin priz almış birim hacim kütlesi, atık kâğıt ve genleşmiş perlit kullanılmayan (HB1-HB4)karışımlarda 908 -951 kg/m³ aralığında değişim göstermiştir. Çimento dozajı arttıkça betonun yoğunluğunun da arttığı belirlenmiştir. Karışımdaki agreganın %20'si atık kağıt+%15'i genleşmiş perlit olan 2. seri karışımlarda (HB5-HB8) hafif beton örneklerinin priz almış birim hacim kütlesi 721 – 782 kg/m³ aralığında değişim göstermiş olup, çimento dozajı arttıkça betonun yoğunluğunun da arttığı belirlenmiştir. Karışımdaki agreganın %35'i atık kağıt+%15'i genleşmiş perlit olan 3. seri karışımlarda (HB9-HB12) hafif beton örneklerinin priz almış birim hacim kütlesi ise 661 – 727 kg/m³ aralığında değişim göstermiştir. Karışım tasarımında atık kağıt kullanım oranı arttıkça, beton yoğunluğunun azaldığı, ancak çimento kullanımı artışının yoğunluğu artırıcı faktör olduğu belirlenmiştir. Genel eğilim A/Ç oranı arttıkça, beton yoğunluğu da azalmakta ve daha hafif bir beton elde edilmektedir. Gözenekli agrega kullanılan beton karışımlarında bu olgu sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Çalışma kapsamında oluşturulan tüm karışım tasarımlarına ait A/Ç oran değişimine karşın elde edilen HAHB yoğunlukları grafiksel analizle Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. HAHB tasarımlarının A/Ç oranı – birim hacim kütle ilişkisi

Şekil 7 irdelendiğinde görüldüğü üzere, A/Ç oranı arttıkça (daha fazla gözenekli agrega kullanıldıkça) hafif betonun birim hacim ağırlığı azalmaktadır. Diğer bir değişle daha hafif yoğunlukta bir beton tasarımı elde edilmektedir. Bu da taşıyıcı olmayan kâgir duvar birimlerin üretilmesinde hafif yapı elemanı elde edilmesine olanak sağlamasının yanı sıra bu elemanlarla örülecek duvarların bina ölü yükünü azaltmada önemli bir rol oynayacağı kaçınılmaz olacaktır. Bununla beraber, inşaat projesinin içinde bulunduğu lokasyonda öngörülen sınır ısı yalıtım performans gereklerinin daha kolay sağlanabilmesine de önemli katkı sağlayacaktır. Literatürde hafif kâgir blok üretiminde kullanılmak üzere tasarlanan hafif betonların yoğunluklarının kullanılan agrega ve karışım tasarımına göre 580-1110 kg/m³ aralığında değişebildiği gözlemlenmektedir [18-19,26]. Bu çalışma kapsamında tasarlanan II. ve III. seri karışımlarda atık kâğıt ve genleşmiş perlit agregaların harmanlanarak kullanımı, kontrol betonunun birim ağırlık değerlerine göre önemli ölçüde düşüş eğilimi gösterdiği görülmektedir. Kontrol örneklerinde çimento dozajına bağlı olarak A/Ç oranı 0.30'dan - 0.24'e azalan bir değişim göstermekte olup, sertleşmiş beton örneklerinin yoğunlarının ise bu değişimde 908 kg/m³'ten 951 kg/m³'e arttığı belirlenmiştir. Benzer eğilim II. ve III. seri karışımlarda görülmüş olup, HB5 - HB8 karışımlarında A/Ç oranı 0,34'ten – 0,28'e azalan bir değişim göstermekte olup, HAHB yoğunluklarının ise bu değişimde 721 kg/m3'ten 782 kg/m3'e arttığı; HB9 -HB12 karışımlarında A/Ç oranı 0,35'ten - 0.31'e azalan bir değişim göstermekte olup, HAHB yoğunluklarının ise bu değişimde 661 kg/m³'ten 727 kg/m³'e arttığı belirlenmiştir. A/Ç oran artışına bağlı HAHB yoğunluklarının düşmesi, yukarıda da değinildiği gibi HAHB dayanım değerlerini de düşürmektedir. Bu olgu çalışma kapsamındaki tüm örnek verileri bağlamında Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. HAHB örnekleri birim hacim kütle - basınç dayanımı ilişkisi

HAHB örneklerinin birim hacim kütlesine bağlı basınç dayanımı değişimi arasında lineer kabul edilebilecek bir istatistiksel ilişki olduğu görülmektedir.

Toplam agreganın ağırlıkça %20 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin harmanlanarak kullanılmış olduğu HB4 – HB8 karışımlarında, HAHB yoğunlukları çimento dozajına bağlı olarak 721 – 782 kg/m³ aralığında değişim göstermiştir. Artan çimento dozajı, HAHB yoğunluklarını artırmıştır. Eşdeğer çimento dozajında hazırlanmış kontrol örneklerine göre daha düşük yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Örneğin; 110 kg/m³ dozajlı HB1 ve HB5 kodlu örneklerin yoğunlukları arasındaki değişim %20,6'dır. Benzer şekilde 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı test örneklerindeki yoğunluk düşüşü sırasıyla HB2 ve HB6 için %19,3, HB3 ve HB7 için %18,3 ve HB4 ve HB8 için ise %17,7'dir. Diğer taraftan, %35 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin harmanlanarak kullanılmış olduğu HB9 – HB12 karışımlarında, HAHB yoğunlukları çimento dozajına bağlı olarak 661 - 727 kg/m³ aralığında değişim

göstermiştir. Artan çimento dozajı, benzer şekilde HAHB yoğunluklarını artırmıştır. Eşdeğer çimento dozajında hazırlanmış kontrol örneklerine göre daha düşük yoğunluk değerlerindeki değişim; 110 kg/m³ dozajlı HB1 ve HB9 kodlu örneklerin yoğunlukları arasındaki değişim %27,2'dir. 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı test örneklerindeki yoğunluk düşüşü sırasıyla HB2 - HB10 için %25,4, HB3 - HB11 için %24,2 ve HB4 - HB12 için ise %23,5'tir.

3.1.2. Su Emme

Selülozik karakterli atık kâğıt malzemeler genellikle selülozik yapıları sebebiyle su tutucu malzemeler olarak bilinmektedir. Özellikle lifsel dokuya sahip materyallerin, kullanım yerlerinde suya maruz kalmaları durumunda lif uzanımları ve boylarınca betonun matris yapısında suyun ilerleme yolunun oluşumuna katkı sağladığı görülmektedir. Bu nedenle, yüksek selüloz içeren karışım tasarımlarının su tutucu özellikler sergileyeceği ve yüksek su emme değerleri gösterebileceği düşünülür. Ayrıca, genleşmiş perlit agregalar, maruz kaldıkları ısıl işlem sonrası yüksek gözeneklilikleri sebebiyle yüksek su emeci agregalar olarak da bilinmektedir. Bu bağamda, atık kâğıt ve genleşmiş perlit agregaların harmanlanarak birlikte HAHB karışımlarında ana agrega olarak kullanımları, özel su itici katkıların kullanılmaması durumunda betonun su emme olgusunu artıracağı kaçınılmaz olacaktır. Literatür çalışmalarında da belirtildiği üzere, su emme kapasitesinin yüksek olması, hafif betonların dayanımını ve ısı iletkenliğini olumsuz yönde etkileyebilir [26]. Bu çalışma kapsamında uygulanan bütün test sonuçları, karışımdaki A/Ç oranının artması, HAHB örneklerinin kütlece su emme oranlarını da arttırdığını göstermektedir (Çizelge 4). Bunun yanı sıra, çimento dozajı arttıkça, betonun su emme kapasitesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Böylece, HAHB örneklerinin dayanımı ile su emme kapasiteleri arasında bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. HAHB örneklerinin dayanım - kütlece su emme değişimi Şekil 9'da iliskilendirilmistir.



Şekil 9. HAHB örnekleri basınç dayanımı - kütlece su emme oranı ilişkisi

Kontrol örneklerinin kütlece su emme değerleri %11,1 - %23,2 aralığındadır. Çimento dozajı arttıkça, su emme değeri düşmektedir. HAHB örneklerinin matris yapısı daha su geçirimsiz bir form kazanmaktadır. Atık kâğıt ve genleşmiş perlit agrega varlığı, karışım tasarımlarına dahil olduğunda, matris yapının su emme değerlerinde belirgin bir artış olduğu tespit edilmiştir. Özellikle, ağırlıkça %20 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin harmanlanarak kullanılmış olduğu II. seri karışım tasarımlarında 110 kg/m³ çimento dozajlı (HB5) örneklerinin su emme değerleri %37 iken, 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı (HB6, HB7 ve HB8) test örneklerinin su emme değerleri sırasıyla %31,8, %31,3 ve %25,7 olarak ölçülmüştür. Buradan görüldüğü üzere, artan çimento dozajı matris yapının su emme kabiliyetini düşürmekte ve ayrıca yukarıda da değinildiği üzere dayanımını da artırmaktadır. Benzer olgu, III. seri karışımda da belirlenmiş

olup, artan atik kâğit kullanım miktarı, matris yapının su emme değerini de artırmıştır. Karışım tasarımında değişken bir parametre olarak atık kâğıt kullanım miktarının değişimini irdelemek amacıyla, eşdeğer çimento dozajlardaki su emme değerleri dikkate alınacak olur ise; HB5 – HB9 örneklerinde %15'lik atık kâğıt miktarı artışı beton örneğinin su emme değerinin (%5 artışla) %37'den %42'ye çıkmasına sebep olmuştur. HB6 – HB10 örneklerinde %15'lik atık kâğıt miktarı artışı beton örneğinin su emme değerinin (%8 artışla) %31,8'den %39,8'e çıkmasına sebep olmuştur. Benzer şekilde HB8 – HB12 örneklerinde ise (%11,6 artışla) %25,7'den %37,3'e yükselmiştir. Bu çalışmada bariz görülen bir durum, çimento dozajı artmasına rağmen atık kâğıt miktarındaki sabit artış oranı, kütlece su emme oranının beklenilenden daha yüksek değerde artmasına neden olduğudur. Literatürde hafif bokların üretiminde kullanılması amaçlanan hafif betonların su emme miktarları %20 ile %40 aralığında değer alabilmektedir [18-19,26].

3.1.3. Kuruma Büzülmesi ve Rutubet Genleşmesi

Kuruma büzülmesi, sertleşmiş betondan çevreye nem kaybının bir sonucudur. Kurutma büzülmesi, dış nem iç nemden düşük olduğunda suyun içten buharlaşması sonucu çimento esaslı malzemelerde oluşan hacim azalması olarak da tanımlanmaktadır [29]. Betondaki ince gözeneklerin yapısı içinde oluşan kılcal gerilimin gelişmesiyle sonuçlanan kılcal nem kaybı nedeniyle, sertleşmiş betonun hacminin azalması veya büzülmesidir [21-23,30-31]. Beton ilk yaşlarda suyunu daha hızlı kaybeder. Buharlaşma hızını etkileyen faktörler devam ettikçe toplam su kaybı zamanla artar ve buna bağlı olarak da büzülme miktarında artış görülebilmektedir. Kuru karışım kıvamında hafif betondan mamul kâgir yapı elamanlarında, karışım tasarımlarında karma suyu oranı genellikle düşük değerlerde olduğu için, bünyesinde su tutmayan beton birimlerinde kuruma büzülmesi oranları genellikle düşü düzeylerde görülebilmektedir. Ancak, bünyesinde su tutan ve/veya tuttuğu suyu bünyesinden uzun sürede atabilen beton birimlerinde kuruma büzülmesi değerleri daha yüksek değerlerde görülebilmektedir. Çalışma kapsamında hazırlanan tüm karışımlara ait örneklerin kuruma büzülme değerleri belirlenmiş olup, çimento dozajındaki değişimlere göre parametrik bulgular Şekil 10'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 10. HAHB örnekleri için çimento dozajına bağlı kuruma büzülmesi değişimi

Çalışmada elde edilen bulgularda, çimento dozajı arttıkça tüm serilerde 28 gün kür sonrası kuruma büzülmesi değerlerinin arttığı görülmektedir. Kontrol amaçlı hazırlanan BH1-BH4 karışımlarında kuruma büzülmesi %0,049 - %0,059 aralığında artarak değişmektedir. Literatür çalışmalarına göre, betonun yoğunluk değeri arttıkça kuruma büzülmesinin arttığını göstermektedir [26]. BS 6073 standardı Bölüm 1'de, duvar elemanları için, kuruma büzülmesinin ortalama %0,06 veya daha az olması gerektiği belirtilmektedir. Bu değerlendirme referans olarak kabul edilecek olur ise, çalışmada elde edilen tüm

serilerin kuruma büzülmesi değerleri, bu referans sınır değerin kapsamında kalmaktadır. Bununla birlikte, ağırlıkça %20 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin harmanlanarak kullanılmış olduğu II. seri karışım tasarımlarında 110 kg/m³ çimento dozajlı (HB5) örneklerinin kuruma büzülmesi değeri %0.042 iken, 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı (HB6, HB7 ve HB8) test örneklerinin kuruma büzülmesi değerleri sırasıyla %0,046, %0,053 ve %0,054 olarak ölçülmüştür. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit agrega ilavesi, HAHB beton örneklerinin kuruma büzülmesi değerlerini %0,005 - %0,007'lik bir farkla azalmasına sebep olmuştur. Bunda etken olan husus, atık kâğıt ve genleşmiş perlitin su tutma özellikleri sebebiyle HAHB matris yapısındaki ince gözeneklerin içinde saklı kalan nem kaybının düşük oluşu, sertleşmiş betonun hacminin daha düşük düzeylerde azalmasına ve dolayısıyla daha az büzülmesine olanak sağladığı şekliyle yorumlanmıştır. Benzer olgu, atık kâğıt kullanım oranının artırıldığı III. seri HAHB beton örneklerinde biraz daha belirginleştiği gözlenmiştir. Bu serideki örneklerde; 110 kg/m³ çimento dozajlı (HB9) örneklerinin kuruma büzülmesi değeri %0,034 iken, 150, 180 ve 200 kg/m3 dozajlı (HB10, HB11 ve HB12) test örneklerinin kuruma büzülmesi değerleri sırasıyla %0,044, %0,050 ve %0,052 olarak ölçülmüştür. Bu bağlamda, %350 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit agrega ilavesi, HAHB beton örneklerinin kuruma büzülmesi değerlerini kontrol örneklerininkine göre %0,007 - %0,016'lik bir farkla azalmasına sebep olmuştur.

Sertleşmiş beton nemli bir ortama veya suya maruz kaldığında nemi emer ve genleşme özelliği gösterir. Ortamdaki nemin artmasıyla oluşan hacim genleşme deformasyonuna rutubet genleşmesi veya ıslak genleşme deformasyonu denilmektedir. [30-31]. Betonun gözeneklerine su sızmasıyla betonun nem içeriği arttığında ıslak genleşme deformasyonu gösterir. Islak genleşme deformasyonunun çimento koloidinin nemi emmesi nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Su molekülleri çimento koloidine nüfuz ettiğinde, jel parçacıklarının yüzey gerilimi su moleküllerinin nüfuz etmesiyle azalır ve jel parçacıklarının kohezyonu su molekülleri tarafından aşılır. Bunun sonucunda da beton genleşme olgusu gösterir [32-33]. Bina inşaat projelerinde ara bölme duvarlar, pozisyonları itibariyle suya ve neme maruz kalma olasılığı en düşük birimler olarak değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, duvar birimlerin örüm işlemi sonrası yüzeylerinin sıva ve/veya bir kaplama malzemesi ile kaplanması sonucu, olası nem varlıklarına karşı daha korunaklı birimler şekline gelmektedir. Bu nedenle, özellikle iç bölme duvar birimlerinde kâgir elemanların rutubet genleşme olguları çoğu projede önemsenmeyebilmektedir. Ancak, çalışma kapsamında tasarlanan karışımlarda yüksek su emici ve su tutucu bileşenlerin yer alması sebebiyle, hazırlanan tüm karışım serilerinin rutubet genleşme değerleri analiz edilmesi ve atık kâğıt – genleşmiş perlit agrega kullanımının beton matrisinde olası rutubet genleşme olgusuna ne denli etkiyen bir rol oynadığı irdelenmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda, çalışma kapsamında çimento dozajındaki değişimlere göre parametrik bulgular Şekil 11'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 11. HAHB örnekleri için çimento dozajına bağlı rutubet genleşmesi değişimi

3.2. Kagir Blok Analizi

3.2.1. Basınç Dayanımı ve Birim Ağırlık

Hafif agregalı çimento esaslı betondan mamul kâgir duvar bloğu elemanlarının üretim ve teknik özelliklerinin irdelenmesi TS EN 771-3 standardında öngörülen parametrelere göre yapılabilmektedir. Birebir boyutta tasarlanan kâgir blok elemanının bu standarda göre irdelenmesinde, birim ağırlık ve basınç dayanım değerleri için herhangi bir limit değer öngörülmemiş olup, kagir blok üreticinin beyanlarının esas alınması vurgulanmıştır. Ancak, her ne kadar bu özellikler için standartta limit değerler tanımlanmamış olsa da pratik uygulamalarda blok elemanları arasında mukayesenin yapılabilmesi amacıyla birim ağırlık ve basınç dayanım değerleri önem arz etmektedir. Birim ağırlığı düşük olan blok elemanları gerek duvar ölü yükünü azaltma yönünde, gerekse ısı yalıtım performansı açısından daha yalıtımlı bir karakteristik sergilemesi bakımından önemlidir. Bununla birlikte, basınç dayanım değerinin yüksek olması, blok elemanının gerek nakliye ve gerekse şantiye içerisinde taşınması süreçlerinde daha az zayiat oluşturması bağlamında da önemli olmaktadır. Özellikle taşıyıcı olmayan duvarlarda dolgu ve ısı yalıtım amacıyla uygulanacak kâgir blok elemanlarının duvar örgüsünde örgü harcı tabakalarında bağ kuvvetini artıcı özel tasarım aksesuarların donatı amaçlı kullanımı koşuluyla, saha tecrübelerinde elde edilen bulgular ışığında basınç dayanım değerinin ≥1.00 MPa olması öngörülebilmektedir. Çalışma kapsamında tüm karışım serilerine ait HAHB karışımlarını temsilen HAKB tasarımlarının kâgir blok birim ağırlığı ve blok elemanların basınç dayanım değerleri arasındaki ilişki Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. HAKB tasarımlarının blok birim ağırlığı - basınç dayanım ilişkisi

Kâgir blok birim ağırlığı harç tasarımındaki kullanılan çimento dozajına bağlı olarak değişim göstermektedir. Çimento dozajı artıkça bloğun kuru birim ağırlığı da artmaktadır. Kontrol HAHB tasarımlarındaki HB1-HB4 karışımlarına ait HAKB elemanların birim ağırlıkları 5,68 kg – 6,05 kg arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB5 – HB8 karışımlarına ait HAKB elemanların birim ağırlıkları ise 4,75 kg – 5,21 kg arasındadır. Bu değişim, eşdeğer çimento dozajında %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB5 – HB8 karışımlarına ait HAKB elemanların birim ağırlıkları ise 4,75 kg – 5,21 kg arasındadır. Bu değişim, eşdeğer çimento dozajında %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımının kagir bloğun birim ağırlıklarında 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında sırasıyla %16,4, %15,2, %14,4 ve %13,8'lik hafiflemesine olanak sağlamıştır. Benzer olgu %35 atık kâğıt kullanımlı III. seri karışım tasarımlarında da belirlenmiş olup, 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında blok birim ağırlıkları sırasıyla kontrol bloğunun değerlerine göre %22,7, %21, %19,9 ve %19,2 oranlarında hafiflemesine olanak sağlamıştır. Blok elemanının birim ağırlığındaki bu hafifleme olgusu aynı zamanda, bu blok elemanlarının ısı yalıtım performanslarının da daha iyileşeceğinin bir göstergesi olabilmektedir.

HAKB elemanların her üç ayrı seri karışım tasarımları için basınç dayanım değerleri irdelendiğinde, blok birim ağırlığı artışına bağlı olarak dayanım değerlerinin de arttığı görülmektedir. Kontrol HAHB tasarımlarındaki HB1-HB4 karışımlarına ait HAKB elemanların basınç dayanımları 1,77 – 2,17 MPa arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB5 – HB8 karışımlarına ait HAKB elemanların basınç dayanımları 1,07 – 2,17 MPa arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB5 – HB8 karışımlarına ait HAKB elemanların basınç dayanımları ise 1,05 – 1,50 MPa arasındadır. Bu değişim, eşdeğer çimento dozajında %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımının kagir bloğun basınç dayanımları 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında kontrol blok tasarımlarının değerlerine kıyasla sırasıyla %40,6, %30,1, %35,4 ve %30,8 oranlarında azalmıştır. Benzer olgu %35 atık kâğıt kullanımlı III. seri karışım tasarımlarında da belirlenmiş olup, 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında blok dayanımları sırasıyla kontrol bloğunun değerlerine göre %48,2, %42,6, %46,9 ve %44,4 oranlarında azalmıştır. Çalışma kapsamında HB9 karışımı hariç, diğer tüm karışım tasarımlarıyla elde edilen HAKB elemanların basınç dayanımları ≥1.00 MPa değerinden daha büyüktür. Bu bağlamda, bu blok elemanlarının taşıyıcı olmayan duvarlarda dolgu ve ısı yalıtım amacıyla uygulanacak kâğır blok elemanları için öngörülebilen mukavemet gereksinimini karşılamaktadır (Şekil 12).

3.2.2. Isıl İletkenlik

Birim ağırlığı düşük ve gözenekli agregalarla imal edilmiş boşluklu geometrik tasarımlara sahip kâgir blok elemanları, taşıyıcı olmayan dolgu duvarlarda bina ısı yalıtım performansına yardımcına olan önemli yapı bileşenleri olarak görülmektedir [26,34-37]. Bir kâgir duvarın ısı geçişine karşı göstermiş olduğu direncin yüksek olması için, duvarı oluşturan kagir blok elemanının ısıl iletkenlik değerinin küçük oluşuna bağlıdır. Diğer bir değişle, kâgir elemanın ısıl iletkenlik değeri ne kadar küçük ise o ölçüde ısı yalıtım performansı yüksek olacaktır. HAKB elemanlarının ısıl iletkenlik değerleri, laboratuvar koşullarında oluşturulmuş korumalı sıcak kutu düzeneği yöntemiyle belirlenmiştir. Çalışma kapsamında tüm karışım serilerine ait HAHB karışımlarını temsilen HAKB tasarımlarının kâgir blokların brüt birim kütle değeri - blok elemanların ısıl iletkenlik değeri arasındaki ilişki Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. HAKB tasarımlarının blok brüt birim hacim kütle – ısıl iletkenlik değeri ilişkisi

Kâgir bloğun brüt birim hacim kütle değeri düştükçe, ısıl iletkenlik değeri de düşmektedir. Karışım tasarımında çimento dozajının artışı, blok elemanın ısıl iletkenlik değeri artırmaktadır. Kontrol HAHB tasarımlarındaki HB1-HB4 karışımlarına ait HAKB elemanların 0,203 – 0,212 W/mK arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB5 – HB8 karışımlarına ait HAKB elemanların ısıl iletkenlik değeri de ise 0,176 – 0,186 W/mK arasındadır. Bu değişim, eşdeğer çimento dozajında %20 atık kâğıt ve

%15 genleşmiş perlit kullanımının kagir bloğun ısıl iletkenlik değerinde 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında sırasıyla %13,5, %12,8, %12,7 ve %12,2 oranlarında artış sağlamıştır.

Çalışma kapsamında dikkat çekici bir bulgu, karışım kombinasyonunda atık kâğıt miktarı arttıkça, ısıl iletkenlik değerlerinin düşme eğilimi göstermesidir. Örneğin ağırlıkça %20 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin harmanlanarak kullanılmış olduğu II. seri karışım tasarımlarında 110 kg/m³ çimento dozajlı (HB5) örneğin ısıl iletkenlik değeri 0,176 W/mK iken, eşdeğer dozajdaki %35 oranında atık kâğıt kullanımlı HB9 örneğin ısıl iletkenlik değeri 0,147 W/mK olarak belirlenmiştir. Bu olgu, eşdeğer oranda çimento kullanımlı kontrol blok örneğine göre %25 ve %35 atık kâğıt kullanımlı karışımlar için sırasıyla %13,5 ve %27,8 oranında ısıl iletkenlik değeri düşmüştür. Benzer olgunun 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı test örneklerinin değerlerinde de oluştuğu açıkça görülmektedir.

%35 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB9 – HB12 karışımlarına ait HAKB elemanların ısıl iletkenlik değeri ise 0,147 – 0,163 W/mK arasındadır. Bu değişim, eşdeğer çimento dozajında %35 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımının kagir bloğun ısıl iletkenlik değerleri, kontrol blok örneklerine kıyasla 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında sırasıyla %27,8, %24,8, %23,3 ve %23,2 oranlarında azalma sağlamıştır.

RILEM [28] dokümanında, yalıtım amaçlı kullanılacak olan kâgir blok elemanlarının ısı iletkenlik limiti λ <0,30 W/mK olarak belirlenmiştir. Ayrıca literatürde, hafif agregalı betondan yapılmış kâgir blokların yoğunluğunun 1450 kg/m³'ten daha düşük olması gerektiği vurgulanmaktadır [25]. Her üç seri karışım tasarımıyla üretilen HAKB örneklerinin tamamı, RILEM'in belirlediği teknik sınırları karşılamakta ve bu elemanların taşıyıcı olmayan duvar uygulamalarında dolgu ve aynı zamanda yalıtım amacıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, atık kâğıt, pomza ve genleşmiş perlitin etkili ve kaliteli bir hafif kâgir blok elemanı üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Hafif beton karışımında atık kâğıdın betonun dayanımına etkisinin incelenmesi ve atık kâğıt içeren beton için karışım oranlarının değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre;

- HAHB küp örneklerinin 28 gün kür sonrası basınç dayanım değerleri 2,76 MPa 3,38 MPa aralığında belirlenmiştir. Atık kâğıt kullanımın artışı ile basınç dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiş, HB9 – HB12 karışımlarında, basınç dayanım değerleri çimento dozajına bağlı olarak 1,43 MPa – 1,88 MPa aralığında değişim göstermiştir. Bununla birlikte, RILEM sınır değerlerine baz alındığında dolgu ve yalıtım amaçlı hafif betonlar için minimum öngörülen 0,5 MPa'lık basınç dayanım değerlerinin bütün seriler için sağlandığı gözlemlenmiştir.
- 2. HAHB küp örnekleri üzerinde yapılan çalışmalardan elde edilen bir diğer bulgu ise A/Ç oranı arttıkça örneklerin yoğunluklarının ve buna bağlı olarak basınç dayanım değerlerinin düşüşüdür.
- 3. Kontrol örneklerinin kütlece su emme değerleri %11,1 %23,2 aralığında tespit edilmiştir. HB8
 HB12 örneklerinde ise (%11,6 artışla) %25,7'den %37,3'e yükselmiştir. Bu çalışmada bariz görülen bir durum, çimento dozajı artmasına rağmen atık kâğıt miktarındaki sabit artış oranı, kütlece su emme oranının beklenilenden daha yüksek değerde artmasına neden olduğudur.
- 4. Çalışmada elde edilen bulgularda, çimento dozajı arttıkça tüm serilerde 28 gün kür sonrası kuruma büzülmesi değerlerinin arttığı görülmektedir. Kontrol amaçlı hazırlanan BH1-BH4 karışımlarında kuruma büzülmesi %0,049 %0,059 aralığında artarak değişmektedir. Bununla birlikte, atık kâğıt ve genleşmiş perlitin su tutma özellikleri sebebiyle HAHB matris yapısındaki ince gözeneklerin içinde saklı kalan nem kaybının düşük oluşu, sertleşmiş betonun hacminin daha düşük düzeylerde azalmasına ve dolayısıyla daha az büzülmesine olanak sağladığı gözlemlenmiştir. 110 kg/m³ çimento dozajlı (HB9) örneklerinin kuruma büzülmesi değeri %0,034 iken, 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı (HB10, HB11 ve HB12) test örneklerinin kuruma büzülmesi değerleri sırasıyla %0,044, %0,050 ve %0,052 olarak ölçülmüştür.

- 5. Bu çalışmada üretilen HAKB elemanların birim ağırlıkları 5,68 kg 6,05 kg arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB5 HB8 karışımlarına ait HAKB elemanların birim ağırlıkları ise 4,75 kg 5,21 kg arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımının kagir bloğun birim ağırlıklarında 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında sırasıyla %16,4, %15,2, %14,4 ve %13,8'lik hafiflemesine, III. seri karışım tasarımlarında da 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında blok birim ağırlıkları sırasıyla kontrol bloğunun değerlerine göre %22,7, %21, %19,9 ve %19,2 oranlarında hafiflemesine olanak sağlamıştır.
- 6. HB1-HB4 karışımlarına ait HAKB elemanların basınç dayanımları 1,77 2,17 MPa arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB5 – HB8 karışımlarına ait HAKB elemanların basınç dayanımları ise 1,05 – 1,50 MPa arasındadır. III. seri karışım tasarımlarında da 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında blok dayanımları sırasıyla kontrol bloğunun değerlerine göre %48,2, %42,6, %46,9 ve %44,4 oranlarında azalmıştır.
- 7. Çalışma kapsamında HB9 karışımı hariç, diğer tüm karışım tasarımlarıyla elde edilen HAKB elemanların basınç dayanımları ≥1.00 MPa değerinden daha büyüktür. Bu bağlamda, bu blok elemanlarının taşıyıcı olmayan duvarlarda dolgu ve ısı yalıtım amacıyla uygulanacak kâgir blok elemanları için öngörülebilen mukavemet gereksinimini karşılamaktadır.
- HB1-HB4 karışımlarına ait HAKB elemanların 0,203 0,212 W/mK arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB5 – HB8 karışımlarına ait HAKB elemanların ısıl iletkenlik değeri de ise 0,176 – 0,186 W/mK arasındadır. %35 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB9 – HB12 karışımlarına ait HAKB elemanların ısıl iletkenlik değeri ise 0,147 – 0,163 W/mK arasındadır.

Çalışma sonuçlarına göre, kâgir blok elemanlarının yalıtım amaçlı kullanımında öngörülen ısıl iletkenlik limiti λ <0,30 W/mK olarak belirlenmiştir. Ayrıca, hafif agregalı betondan yapılmış kâgir blokların yoğunluğunun 1450 kg/m³'ten daha düşük olması gerektiği vurgulanmaktadır. RILEM değerlendirmelerine göre, dolgu ve yalıtım amaçlı hafif betonlar için en düşük 0,5 MPa'lık basınç dayanım değeri de vurgulanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, her üç seri karışım tasarımıyla üretilen HAKB örneklerinin tamamı, öngörülen teknik limitleri karşılamakta olup, taşıyıcı olmayan duvar uygulamalarında dolgu ve aynı zamanda yalıtıma katkı sağlayan kâgir blok elemanları olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Katkı Beyanı

Lütfullah GÜNDÜZ: Araştırma tasarımı, literatür taraması ve değerlendirilmesi, verilerin ve analizlerin doğrulanması, bulguların yorumlanması, makalenin yazılması.

Şevket Onur KALKAN: Veri toplama, veri analizi, verilerin ve analizlerin doğrulanması, makalenin yazılması.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

Kaynaklar

- [1] MdNaeem QM, Khan UA, Diliprao PO, Chandrakant SA, Augad VA. Effective Utilization of Waste Paper Into Bricks / Papercrete Wall Panels. IARJSET International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology 2021; 8(4): 2393-8021.
- [2] Al Shibani TMS, Patil SG, Edin AMNS. Study on Masonry Blocks Fabricated from Waste Paper and Industrial Waste Spent Catalyst. International Journal of Environmental Engineering– IJEE 2016; 3(3): 28-32.

- [3] Ekong SA, Oyegoke DA, Edema AA, Robert UW. Density And Water Absorption Coefficient of Sandcrete Blocks Produced With Waste Paper Ash As Partial Replacement of Cement. Advances In Materials Science 2022; 22(4): 85-97.
- [4] Mohammed BS. Papercrete as infill Material for Composite Wall System. European Journal of Scientific Research 2009; 34(4): 455-462.
- [5] Robert UW, Etuk SE, Agbasi OE, Okorie US, Lashin A. Hygrothermal properties of sandcrete blocks produced with raw and hydrothermally-treated sawdust as partial substitution materials for sand. Journal of King Saud University–Engineering Sciences 2021. (In Press). https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.10.005
- [6] Azar JP, Najarchi M, Sanaati B, Najafizadeh MM, Mirhosseini SM. The experimental assessment of the effect of paper waste ash and silica fume on improvement of concrete behavior. KSCE Journal of Civil Engineering 2019; 23: 4503 – 4515.
- [7] Robert UW, Etuk SE, Iboh UA, Umoren GP, Agbasi OE, Abdulrazzaq ZT. Thermal and mechanical properties of fabricated plaster of paris filled with groundnut seed coat and waste newspaper materials for structural application. Építôanyag-Journal of Silicate Based and Composite Materials 2020; 72(2): 72 – 78.
- [8] Ochoa de Alda JAG. Feasibility of Recycling Pulp and Paper Mill Sludge in the Paper and Board Industries. Resources, Conservation and Recycling 2008; 52(7): 965-972.
- [9] Delcasse MM, Rahul V, Abhilash C, Pavan MK. Papercrete Bricks An Alternative Sustainable Building Material. Int. Journal of Engineering Research and Application 2017; 7(3): 9-14.
- [10] Manisha NG. Constructing structures using ecobricks. Internatonal Journal of Recent Trends in Engineering & Research 2016; 2(4): 159-164.
- [11] Matthew W. Developing a Low cost, Sustainable Housing Prototype using Recycled Waste Materials in Tijuana, Mexico. In: 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, Irlanda; 2008.
- [12] Karthik A, Mohammed NR, Vetrivel S, Atharsh KR, Vijay M. Study On Hollow Block Using Waste Paper And Plastics. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR) 2024;11(3): 277-291.
- [13] Yusoff, TMAT, Jeni, MLA, Kosnin HB. Mechanical Properties of Concrete Block Containing Recycled Paper Sludge (RPS) as Replacement Material. Progress in Engineering Application and Technology 2023; 4(2): 772-779.
- [14] Akinwumi II, Olatunbosun OM, Olofinnade OM, Awoyera PO. Structural evaluation of lightweight concrete produced using waste newspaper and office paper. Civil and Environmental research 2014; 6(7): 160-167.
- [15] Solahuddin BA, Yahaya FM. Properties of concrete and structural behaviour of reinforced concrete beam containing shredded waste paper as an additive. International Journal of Concrete Structures and Materials 2023; 17(1): 26.
- [16] Maroliya MK. Load Carrying Capacity of Hollow Concrete Block Masonry Wall. International Journal of Engineering Research and Applications 2012; 2(6): 382-385.
- [17] Gündüz L, Kalkan ŞO. Yükleme Hızının Hafif Agregalı Farklı Tasarımlarda İmal Edilmiş Kâgir Blok Elemanların Basınç Dayanımına Etkisi. Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 2024: 17(2); 1-18.
- [18] Kalkan ŞO, Gündüz L. The influence of anhydrite III as cement replacement material in production of lightweight masonry blocks for unreinforced non-load bearing walls. Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies 2022; 7(4): 322-338.
- [19] Gündüz L, Kalkan ŞO. Lightweight Cellular Hollow Concrete Blocks Containing Volcanic Tuff Powder, Expanded Clay and Diatomite for Non-Load Bearing Walls. Teknik Dergi 2020; 31(6); 10291-10313.
- [20] Gündüz L, Kalkan ŞO. Sürdürebilir Yapılarda Geotekstil Keçe Katmanlı Hafif Betondan Mamul Kâgir Blok Elemanların Termal Yalıtım Verimliliğinin Geliştirilmesi Üzerine Bir Yaklaşım. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023: 10(21); 182-197.
- [21] Ásgeirsson H. Léttsteypur ur vikri, (Lightweight pumice concrete), IBRI, 1984.

- [22] Gündüz L, Kalkan ŞO. Perlit Genleştirmede Sıcaklık Değişiminin Agrega Karakteristiğine Etkileri Üzerine Bir İnceleme-Yeni Bir Yaklaşım. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 11(1), 21-40.
- [23] Al-Jabri KS, Hago AW, Al-Nuaimi AS, Al-Saidy AH. Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. Cement and Concrete Research 2005; 35: 1472-1479.
- [24] Gündüz L. (Ed.) 1998, Pomza Teknolojisi (Pomza Karakterizasyonu), Cilt I, Temuz 1998, Isparta, s285.
- [25] Berge O. Lätt isolerande konstruktrionsbeton med isländsk pimpsten som ballast, Västra Frölunda, 1983.
- [26] Gündüz L, Kalkan ŞO. Kâgir Blok Üretiminde Farklı Orijinli İki Pomzanın Performansları Üzerine Karşılaştırmalı Bir Analiz: Tomarza ve Tatvan Örneği. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2022; 25(4): 537-555.
- [27] Ilakkiya R, Dhanalakshmi G. Experimental investigation on concrete using waste paper. Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET) 2018: 5(2); 1995-1999.
- [28] Functional Classification of Lightweight Concretes, Recommendation, RILEM LC2, second edition, 1978.
- [29] Ma J, Wang T, Wang H, Yu Z, Shen X. A state-of-the-art review on the utilization of calcareous fillers in the alkali activated cement. Construction and Building Materials 2022; 357: 129348.
- [30] Huang G, Hui R, Wang X. The Creep and Shrinkage of Concrete. China Electric Power Press, 2012; 95-104.
- [31] Asamoto S, Ohtsuka A, Kuwahara Y, Miura C. Study on effects of solar radiation and rain on shrinkage, shrinkage cracking and creep of concrete. Cem. Concr. Res. 2011; 41(6): 590-601.
- [32] Neville AM, Properties of the Concrete, (4th Edition), Pitman Publishing Limited, London, 2000.
- [33] McCarter WJ, Watson DW, Chrisp TM. Surface zone concrete: drying, absorption, and moisture distribution. ASCE J. Mater. Civil Eng 2001; 13(1): 49-57.
- [34] Gündüz L. A technical report on lightweight aggregate masonry block manufacturing in Turkey. Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey 2005; 1-110.
- [35] ESCSI, A Technical report on Rotary Kiln Produced Structural Lightweight Aggregate, Expanded Shale, Clay and Slate, England, pp.1-19, 1997.
- [36] Brown NJ, Skinner M. Report on Concrete Mix Design For Lightweight Masonry Units Using Yali Pumice Coarse and Fine Aggregates. Report No: 89/3408D/2923, STATS Scotland Ltd., East Kilbride, Scotland, UK, 1990.
- [37] Bomhard H. Lightweight concrete structures, potentialities, limits and realities. The Concrete Society, The Construction Press, Lancaster, London, New York, UK, 1980, pp.227-290.



Adıyaman University Journal of Engineering Sciences Adyü J Eng Sci 2025;12(25):93-112 Adıyaman Üniversitesi

Mühendislik Bilimleri Dergisi

Adyü Müh Bil Derg 2025;12(25):93-112

https://doi.org/10.54365/adyumbd.1662482

Research Article / Araştırma Makalesi

Performance Evaluation of PSO Variants for Selective Harmonic Elimination in Multi-Level Inverters

Çok Seviyeli Eviricilerde Seçici Harmonik Eliminasyon İçin PSO Varyantlarının Performans Değerlendirmesi

Hüseyin DOĞAN^{1*},

¹ Selçuk Üniversity, Faculty of Technology, Department of Mechatronics Engineering, Konya, Türkiye

Abstract

In this study, the performance of different Particle Swarm Optimization (PSO) variants in solving the Selective Harmonic Elimination (SHE) equations of a Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter (CHB-MLI) was compared. The SHE method consists of nonlinear transcendental equations, which are particularly difficult to solve analytically in highlevel systems. The aim of the study is to examine the overall improvements provided by the PSO variants and to specifically evaluate their effectiveness in solving such complex engineering problems. In addition to the standard PSO, several improved versions from the literature have been considered. For each variant, the optimal switching angles that solve the SHE equations were determined and applied to a CHB-MLI model in the MATLAB/Simulink environment. The convergence behaviors of the algorithms, the total harmonic distortions (THD) and the amplitudes of the fundamental components of the output voltages were analyzed statistically. As a result of these analyses, the strengths and weaknesses of the PSO variants in the optimization processes were revealed. Based on the findings, a hybrid model was also proposed, which integrates the strong features of the successful variants. It was observed that the proposed hybrid model stands out from the other variants by exhibiting a stable and competitive performance even in the worst-case scenarios. These findings indicate that effectively developed PSO variants can be a powerful alternative for solving real-world optimization problems.

Keywords: PSO, SHE, CHB-MLI, Optimization, PSO Variant, Multilevel Inverter

Öz

Bu çalışmada, farklı Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) varyantlarının Kaskat Bağlı H-Köprü Çok Seviyeli Eviricinin Seçici Harmonik Eliminasyon (CHB-MLI) (SHE) denklemlerini çözmedeki performansları karşılaştırılmıştır SHE yöntemi, özellikle yüksek seviyeli sistemlerde analitik olarak çözülmesi oldukça zor olan doğrusal olmayan transandantal denklemlerden oluşmaktadır. Çalışmanın amacı, PSO varyantlarının genel olarak sağladığı iyileştirmeleri incelemek ve özellikle bu tür karmaşık problemlerindeki mühendislik etkinliklerini değerlendirmektir. Standart PSO'nun yanı sıra, literatürdeki geliştirilmiş bazı PSO versiyonları ele alınmıştır. Her varyant için SHE denklemlerini çözen optimal anahtarlama açıları belirlenerek MATLAB/Simulink ortamında bir CHB-MLI modeline uygulanmıştır. Algoritmaların yakınsama davranışları, çıkış gerilimlerinin toplam harmonik distorsiyonları ve temel bileşen genlikleri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda, PSO varyantlarının optimizasyon süreçlerindeki güçlü ve zayıf yönleri ortaya konmuştur. Ayrıca elde edilen bulgular doğrultusunda, başarılı varyantların seçilen güçlü özelliklerinin entegre edildiği hibrit bir model de önerilmiştir. Özellikle önerilen hibrit modelin, en kötü senaryolarda dahi istikrarlı ve rekabetçi bir performans sergileyerek diğer varyantlardan ayrıştığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, etkin şekilde geliştirilen PSO varyantlarının gerçek dünya optimizasyon problemlerinin çözümünde güçlü bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: PSO, SHE, CHB-MLI, Optimizasyon, PSO Varyantı, Çok Seviyeli Evirici

^{*} Corresponding e-mail (Sorumlu yazar e-posta): <u>huseyindogan@selcuk.edu.tr</u> **Received (Geliş Tarihi):**21.03.2025, **Accepted (Kabul Tarihi):** 11.04.2025

1. Introduction

Particle Swarm Optimization (PSO) has a significant place in nature-inspired metaheuristic optimization algorithms. Initially proposed by Eberhart and Kennedy in 1995 [1], PSO was developed by modelling the collective behaviour of birds and fish moving in flocks or schools [2]. At its core, the algorithm consists of a swarm of particles randomly initialized in a multi-dimensional solution space. The way swarm individuals influence each other while searching for food has served as the inspiration for PSO's fundamental steps in solving optimization problems. Each particle moves within the search space by updating its position and velocity. These movements are guided by both the best position found by the individual particle (*Pbest*) and the best position discovered by the entire swarm (*Gbest*). Due to its simple structure, low computational cost, and broad applicability, PSO has been widely adopted in various engineering problems [3].

However, over time, several limitations of the classical PSO algorithm have been identified in practical applications. In particular, PSO tends to exhibit premature convergence and can become trapped in local minima, which restricts its effectiveness, especially in multimodal and complex search spaces [4]. These issues arise due to the algorithm's inability to properly balance exploration and exploitation during the search process [5]. To overcome these challenges, numerous PSO variants have been developed in the literature[6–9]. The primary goal of these variants is to adapt particle dynamics to the problem structure, ensuring a more effective exploration of the search space while also achieving faster and higher-quality solutions.

In recent years, with the increasing number of metaheuristic optimization algorithms, PSO has been perceived as a less competitive approach and is now primarily used as a benchmark tool to demonstrate the superiority of newly developed optimization techniques. However, the PSO algorithms employed for this purpose are typically either the standard version or variants with only limited enhancements. This situation has led to the neglect of the potential offered by advanced PSO variants. Therefore, evaluating the effectiveness of different PSO variants in real-world optimization problems is of great importance.

Optimization processes in real-world engineering problems often involve nonlinear and complex mathematical models. One such problem is the solution of Selective Harmonic Elimination (SHE) equations for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters (CHB-MLIs). The SHE method consists of nonlinear and transcendental equations [10] designed to eliminate specific harmonic components while maintaining the fundamental component amplitude at a desired level [11]. While these equations can be solved analytically for low-level systems, they are generally highly challenging for high-level inverters [12], necessitating the use of numerical or heuristic methods. In this context, due to its simple implementation and ability to efficiently explore large search spaces, advanced PSO variants are considered a strong alternative for solving SHE equations.

In this study, the performance of different PSO variants in solving SHE equations was compared, and the contributions of various improvements to the optimization process were examined. The analysis revealed that while some variants were successful in certain aspects, they fell short in others. Based on these findings, a new hybrid PSO variant that integrates the most effective strategies of successful PSO variants was developed and included in the evaluation.

With the inclusion of the hybrid model, a total of eight different PSO variants were evaluated through a series of independent runs, where optimal switching angles minimizing the objective fitness function were determined. First, the fitness values produced by each variant were visualized using box plots for comparative analysis, allowing for an overall performance evaluation of the algorithms. Then, to validate the results, the switching angles corresponding to these fitness values were applied to a three-phase star-connected CHB-MLI model in the MATLAB/Simulink environment, and the output voltage waveforms and their frequency spectrums were examined.

Accordingly, the obtained results reveal the strengths and weaknesses of the algorithms, providing significant insights into which strategies are more effective in solving SHE equations. In particular, the proposed hybrid model has distinguished itself from other variants by producing not only consistent overall performance but also demonstrating stable and competitive results even in the worst-case scenarios. Additionally, this study shows that a well-designed PSO variant can be effectively applied not only in theoretical test scenarios but also in real-world problems such as solving SHE equations, as exemplified by the newly developed hybrid variant.

2. Cascaded H-Bridge MLI and Selective Harmonic Elimination Method

CHB-MLI consists of multiple identical and discrete H-bridge inverter modules connected in series [13]. Each module has its own independent power supply, and all modules together generate a staircase-shaped output voltage. Each module forms a single step of this staircase waveform. As the number of modules increases, the output voltage waveform contains more steps, thereby achieving a closer approximation to the desired sinusoidal waveform. This modular design offers various advantages, particularly in high-voltage power systems [14,15]. For instance, when voltage levels need to be increased or decreased, additional modules can be added or removed as needed without requiring a fundamental modification to the entire system. Moreover, since each module operates independently, in case of maintenance or failure, the faulty module(s) can be isolated and replaced without disrupting the entire system. Due to these advantages, despite the increased complexity of control algorithms and the higher number of power switches required, the CHB-MLI topology is preferred over alternative multilevel inverter configurations, particularly in medium- and high-power applications.

In a CHB-MLI, the number of voltage levels depends on the number of independent H-bridge inverter modules used. The relationship between them can be expressed as shown in Equation (1), where k represents the number of H-bridge modules, and n denotes the output voltage levels:

$$n = 2k + 1$$

In this study, the aim is to compare different PSO variants in solving the SHE equations of a three-phase, star-connected 11-level CHB-MLI. In this context, five modules, each with a 50 V DC source per phase, were utilized. Figure 1 illustrates the circuit diagram of each module along with the block diagram representing the module arrangement for each phase, while Figure 2 presents the phase voltage (V_{phase}) of the CHB-MLI, which exhibits a staircase waveform. As observed, each module (Vo_x) constitutes a step of this staircase waveform. To minimize switching losses, each power switch undergoes commutation twice per half-cycle (θ_x , $\pi - \theta_x$).



Figure 1. Circuit diagram of each module and arrangement for the 3-phase 11-level CHB-MLI

(1)



Figure 2. The output voltage waveform for one phase of MLI

Various switching strategies have been proposed in the literature for CHB-MLIs [16]. However, among these approaches, Selective Harmonic Elimination (SHE) has been the most preferred method, particularly in high-power critical applications where power quality is a limiting factor. The primary objective of the SHE method is to determine the optimal switching angles that eliminate specific low-order dominant harmonics in the inverter output voltage while maintaining the fundamental harmonic component at the desired level.

As shown in Figure 2, the Fourier series expansion of a CHB-MLI output voltage waveform can be expressed by Equation (2). Here, V_h represents the amplitude of the h^{th} harmonic. Due to quarter-wave symmetry, even harmonics do not appear in the output voltage. Assuming that all DC sources are equal and considering that five switching angles are required to generate the output voltage of an 11-level inverter, each odd harmonic can be calculated using Equation (3). The switching angles must be within the range $0 < \theta_j < \pi/2$.

$$V(\omega t) = \sum_{\substack{h=1\\5}}^{\infty} V_h \sin(h\omega t)$$
(2)

$$V_h = \frac{4V_{DC}}{h\pi} \sum_{j=1}^{-1} \cos(h\theta_j) \quad h = 1,3,5,7, \dots \quad j = 1,2,3,4,5$$
(3)

When the SHE method is applied to an 11-level MLI, five harmonic equations are derived from Equation (3) to determine the optimal five switching angles. One of these equations represents the fundamental component, while the remaining four are selected based on which harmonics need to be eliminated. As is well known, low-order harmonics have a more dominant effect on power quality. Additionally, due to three-phase symmetry, the third and its multiples are not considered. Therefore, in an 11-level MLI, the elimination of the 5th, 7th, 11th and 13th harmonics is typically targeted. The corresponding harmonic equations are given in Equations (4)–(8).

The most significant challenge of the SHE method is solving these five nonlinear equations with five unknowns. For such nonlinear and complex equations, numerical and algebraic solution methods are often insufficient. Determining the switching angles that satisfy the required conditions can be directly considered an optimization problem. Therefore, metaheuristic optimization techniques are frequently preferred to overcome this challenge in the SHE method [17]. In this study, the performance of different PSO variants, one of the most fundamental metaheuristic optimization algorithms, is compared in solving

this optimization problem. The objective is to determine the optimal five switching angles (θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 , θ_5) that maintain V_1 at the desired reference value while eliminating V_5 , V_7 , V_{11} and V_{13} in the given equations.

$$V_1 = \frac{4V_{DC}}{\pi} \left[\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3) + \cos(\theta_4) + \cos(\theta_5)\right]$$
(4)

$$V_5 = \frac{4V_{DC}}{5\pi} [\cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3) + \cos(5\theta_4) + \cos(5\theta_5)]$$
(5)

$$V_7 = \frac{4V_{DC}}{\frac{7\pi}{4V}} [\cos(7\theta_1) + \cos(7\theta_2) + \cos(7\theta_3) + \cos(7\theta_4) + \cos(7\theta_5)]$$
(6)

$$V_{11} = \frac{4V_{DC}}{11\pi} \left[\cos(11\theta_1) + \cos(11\theta_2) + \cos(11\theta_3) + \cos(11\theta_4) + \cos(11\theta_5) \right]$$
(7)

$$V_{13} = \frac{4V_{DC}}{13\pi} \left[\cos(13\theta_1) + \cos(13\theta_2) + \cos(13\theta_3) + \cos(13\theta_4) + \cos(13\theta_5) \right]$$
(8)

3. Particle Swarm Optimization (PSO) Variants

The objective of this study is to compare the performance of different PSO variants in solving SHE equations. Among the PSO algorithm variants to be compared, it is essential to include the original version first proposed by Kennedy and Eberhart [1], which will hereafter be referred to as Standard PSO (SPSO). At this stage, the fundamental equations and operational steps of SPSO in the context of solving SHE equations will be briefly summarized. This will provide a clearer understanding of PSO's general approach to optimization problems and highlight the specific areas where the examined variants introduce improvements.

PSO is a population-based heuristic optimization algorithm that operates in a multi-dimensional search space. Each particle moves based on both its personal best position (*Pbest*) and the global best position (*Gbest*) within the swarm[18]. The position and velocity updates of the particles form the core of the algorithm, incorporating randomness to balance social and individual knowledge interactions.

The algorithm begins by generating a random initial population consisting of N particles. Each particle represents a solution set containing five angular variables (θ_i), as shown in Equation (9), specifically tailored for solving the SHE equations. This solution must satisfy the constraints given in Equation (10). At the initialization stage, since no predefined solution exists, each particle's current position is considered its personal best solution (*Pbest*_i). Additionally, the velocity parameters (V_i) are set to zero, as it is undesirable for the particles to have any predefined direction at the start of the optimization process. In this way, the candidate initial solutions for solving SHE equations are established

$\theta_i = \left(\theta_{i,1}, \theta_{i,2}, \theta_{i,3}, \theta_{i,4}, \theta_{i,5}\right) \ i \in \{1, 2, \dots, N\}$	(9)
$0 \le \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4 < \theta_5 \le \pi/2$	(10)
$Pbest_i = \theta_i$ $V_i = (0,0,0,0,0)$	(11)

After generating the random initial population, the first fitness scores must be computed to evaluate how close each particle is to an optimal solution. For this purpose, the fitness function derived from the SHE equations, as given in Equation (12), is used. In this equation, the first term controls the amplitude of the fundamental harmonic, while the second term aims to minimize the dominant low-order harmonics [19]. Since solving the nonlinear SHE equations is formulated as a minimization problem, a particle with a lower fitness score represents a better candidate solution. This implies achieving successful suppression of low-order harmonics while maintaining the output voltage at the desired level.

As shown in Equations (13) and (14), the fitness score of each particle in the swarm is evaluated using the given fitness function, and the best solution for the initialization phase is then selected.

$$f_{i} = \left(\left| V_{1ref} - \frac{4V_{DC}}{\pi} \sum_{j=1}^{5} \cos(\theta_{i,j}) \right| + \left(\frac{4V_{DC}}{\pi} \right)^{2} \sum_{k=1}^{4} \left(\frac{1}{h_{k}} \sum_{j=1}^{5} \cos(h_{k}\theta_{i,j}) \right)^{2} \right)$$

$$h = [5,7,11,13]$$

$$F = \begin{bmatrix} F_{1} \\ \vdots \\ F_{k} \\ \vdots \\ F_{N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(\theta_{1}) \\ \vdots \\ f(\theta_{i}) \\ \vdots \\ f(\theta_{N}) \end{bmatrix}$$
(12)

$$Fbest = min(F) \to Gbest = \theta(Fbest) \tag{14}$$

In the equations above, V_{1ref} represents the desired amplitude of the fundamental frequency component of the output voltage, *h* is a vector containing the orders of low-frequency harmonic components to be eliminated in a three-phase system, *F* denotes the fitness vector, and *F_i* is the fitness score of the *i*th particle.

After the initialization phase, the iteration loop begins. In each iteration, the velocity of each particle is first updated based on its current position (θ_i), personal best position (*Pbest*_i), and the position of the best particle in the swarm (*Gbest*), as shown in Equation (15). Then, the updated velocity is added to the current position to obtain the new position, as expressed in Equation (16). The goal is to move each particle closer to the optimal solution while preserving its individual experience.

$$V_{i,j}(t+1) = V_{i,j}(t) + C_1 \cdot r 1 \cdot \left(Pbest_{i,j} - \theta_{i,j}(t) \right) + C_2 \cdot r 2 \cdot \left(Gbest_j - \theta_{i,j}(t) \right)$$
(15)

$$\theta_{i,j}(t+1) = \theta_{i,j}(t) + V_{i,j}(t+1) \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad j \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$$
(16)

In the equations above, *t* represents the current iteration number, while t + 1 denotes the next iteration. r1 and r2 are randomly generated numbers in the range [0,1]. C_1 is the cognitive coefficient that determines a particle's tendency to move toward its personal best position, whereas C_2 is the social coefficient that influences the particle's movement toward the global best position in the swarm. These two parameters together are referred to as acceleration coefficients. In SPSO, both values are set equal ($C_1 = C_2 = 2$) to ensure that particles benefit equally from their individual experiences and the swarm's collective knowledge, thereby establishing a balanced exploration and exploitation process.

At the end of each iteration, the fitness function given in Equation (12) is re-evaluated based on the updated positions of the particles. The personal best positions and the global best position are then updated according to Equations (17) and (18). The process described above is repeated until a predefined maximum number of iterations (T) is reached.

$$f(\theta_i) < f(Pbest_i) \to Pbest_i = \theta_i$$

$$f(Pbest_i) < f(Gbest) \to Gbest = Pbest_i$$
(17)
(18)

At the end of the entire optimization process, the position of the best particle in the swarm (*Gbest*) represents the optimal switching angles determined by PSO for solving the SHE equations, as shown in Equation (19). These angles will be applied to the power switches of the multilevel inverter to achieve the desired output voltage while minimizing low-order harmonics

$$Optimal Switching Angles \rightarrow Gbest = (Gbest_1, Gbest_2, Gbest_3, Gbest_4, Gbest_5)$$
(19)

The standard PSO algorithm exhibits certain structural weaknesses that affect the movement dynamics of particles, particularly in complex and high-dimensional problems. One of the primary weaknesses is the absence of a mechanism to retain the previous velocity component in velocity updates. In standard PSO,

the velocity of each particle is updated solely based on its personal best position and the global best position, without incorporating any mechanism to preserve the particle's current velocity

The lack of dependence on previous velocity disrupts the continuity of particle movement, leading to two major issues. First, when the *Pbest* and *Gbest* positions are very close to the particle's current position, the velocity component reaches very small values, causing the particle to become nearly motionless. This phenomenon, commonly referred to as stagnation in the literature, results in a loss of movement capability, particularly during the convergence phase. On the other hand, as *Pbest* and *Gbest* move further away from the particle, it may take large and uncontrolled jumps toward these attraction points. These two extreme cases hinder an effective exploration of the search space, ultimately negatively impacting the overall performance of the algorithm.

To overcome these issues, one of the first structural modifications proposed in the literature was the introduction of an inertia weight coefficient in the velocity update equation. Therefore, the second variant in the list of PSO variants to be compared is PSOCIW (Constant Inertia Weight PSO) [20], which was the first approach in the literature to incorporate this coefficient with a fixed value. This variant enables particles to retain a portion of their current velocity, facilitating a more balanced exploration and exploitation process in the search space. In the PSOCIW variant, the velocity update equation is redefined as follows, where ω represents a constant inertia weight:

$$V_{i,j}(t+1) = \omega V_{i,j}(t) + C_1 r 1. \left(Pbest_{i,j} - \theta_{i,j}(t) \right) + C_2 r 2. \left(Gbest_j - \theta_{i,j}(t) \right)$$
(20)

With the addition of the inertia weight, PSO gained improved velocity control and enhanced adaptability to different types of optimization problems. As a result, PSOCIW is considered a milestone in PSO literature, and the majority of modern PSO variants have been developed based on this fundamental concept. However, subsequent studies have shown that maintaining a fixed coefficient does not always ensure an effective balance between exploration and exploitation across different optimization processes. Consequently, new variants have been introduced in the literature, where the inertia weight is defined as either a time-varying or randomly selected parameter. In this context, two additional PSO variants included in the comparison are PSOTVIW (Time Varying Inertia Weight PSO) [21] and PSORIW (Random Inertia Weight PSO) [22].

PSOTVIW is one of the fundamental improvements to the fixed inertia weight approach. In this variant, the inertia weight (ω) is defined as a linearly decreasing function as iterations progress. This strategy aims to promote broader exploration in the early iterations and more focused exploitation in later iterations. The inertia weight is defined as shown in Equation (21), where ω_{max} represents the initial maximum inertia weight, and ω_{min} denotes the minimum inertia weight at the final iteration. The velocity update equation includes the inertia weight as in PSOCIW; however, in this case, the coefficient is not fixed but varies over time.

$$\omega(t) = \omega_{max} - (\omega_{max} - \omega_{min}) \cdot \frac{t}{T}$$
(21)

The PSORIW variant offers an alternative approach in which the inertia weight is randomly selected within a predefined range at each iteration. Instead of a deterministic change, this method adopts a dynamic and stochastic inertia management strategy, allowing different levels of exploration and exploitation to be applied in each iteration. This variability helps reduce the risk of getting trapped in local minima and enhances adaptability to different types of optimization problems. The inertia weight for each iteration is determined as follows:

$$\omega(t) = 0.5 + \frac{Rand}{2} \tag{22}$$

Both methods provide a more flexible and adaptive structure compared to PSOCIW. PSOTVIW establishes a systematic exploration-exploitation balance by modelling the natural evolution of the search process, whereas PSORIW enhances search diversity through randomness, aiming to reduce the risk of being trapped in different local minima. While the diversity introduced by PSORIW offers an advantage in highly multimodal and high-dimensional problems, the controlled approach of PSOTVIW tends to be more effective in convex and unimodal problems.

Both variants are considered significant advancements in the use of inertia weight in PSO and have influenced the development of many modern PSO derivatives. Today, hybrid approaches derived from these two strategies are widely utilized in contemporary PSO variants.

In addition to the variants discussed above, numerous studies have explored different approaches to updating the inertia weight. In this context, various PSO derivatives such as CRIWPSO (Chaotic Random Inertia Weight PSO) [23], AIWPSO (Adaptive Inertia Weight PSO) [24], GLBPSO (Global Local Best Inertia Weight PSO) [25], DAPSO (PSO with Dynamic Adaptation) [26], and IPSO (Improved PSO) [27] have been introduced in the literature. However, preliminary performance analyses indicate that these variants do not offer a significant advantage over PSORIW and PSOTVIW. Therefore, among the inertia weight-based improvements, only PSOCIW, PSORIW, and PSOTVIW have been selected as the core methods for comparison in this study.

In early PSO variants, optimization improvements primarily focused on the inertia weight component, with modifications limited to different update strategies (e.g., linear, nonlinear, or adaptive methods based on the iteration count or the relationship between *Pbest* and *Gbest*). No changes were made to the acceleration coefficients (C_1 , C_2) or the velocity-position update mechanisms, nor was an approach similar to the mutation mechanism in genetic algorithms introduced to enhance solution space diversity. These variants preserved the fundamental structure of PSO's original version, including its core velocity and position update equations.

In contrast to the previous variants, the next three variants examined in this study introduce novel approaches beyond just improvements in the inertia weight mechanism. These methods are identified as MPSOTVAC (PSO with Mutation and Time-Varying Acceleration Coefficients) [28], APSO (Adaptive PSO) [29], and IAPSO (Inertia Adaptive PSO) [30], respectively.

In MPSOTVAC, the linearly decreasing inertia weight update approach given in Equation (21) is adopted, while two major improvements are introduced to the standard PSO. The first improvement involves adapting the acceleration coefficients to change over time based on the iteration count. In this enhanced strategy, the C_1 coefficient decreases as iterations progress ($C_{1max} \rightarrow C_{1min}$), whereas the C_2 coefficient increases in contrast ($C_{2min} \rightarrow C_{2max}$). The primary objective of this approach is to enable a broader search (exploration) during the initial stages of the algorithm while ensuring faster and more stable convergence (exploitation) in later iterations.

This strategy is expressed by the following equations:

$$C_{1}(t) = C_{1max} - (C_{1max} - C_{1min}) \cdot \frac{t}{T}$$
(23)

$$C_{1}(t) = C_{1max} - (C_{1max} - C_{1min}) \cdot \frac{t}{T}$$
(24)

The second improvement is a mutation-based velocity update, which activates a random mutation mechanism when particle velocities stagnate and no improvement occurs in the global best solution (*Gbest*). With this mechanism, if the global best value remains unchanged for a certain period, a randomly selected particle undergoes a random perturbation (increase or decrease) in one of its velocity dimensions with a certain probability. This approach aims to prevent the issue of premature convergence. The mutation process is formulated as follows:

$$f(Gbest(t-1)) - f(Gbest(t)) < 0 \to R_1 < pm \to V_{k,d} = \begin{cases} V_{k,d} + R_2 \cdot \frac{V_{max}}{m}, & R_2 < 0.5\\ V_{k,d} - R_2 \cdot \frac{V_{max}}{m}, & R_2 \ge 0.5 \end{cases}$$
(25)

Here, *k* and *d* represent the index of the randomly selected particle and the randomly selected dimension, respectively. *pm* is the mutation probability, *m* is the mutation scale parameter, and R_1 and R_2 are two randomly generated numbers within the range [0,1]. In this mutation mechanism, R_1 determines whether the mutation will be applied, while R_2 determines the mutation direction (increase or decrease). V_{max} represents the velocity limit.

In IAPSO, the inertia weight of each particle is dynamically adjusted based on its distance from the global best position. In this approach, particles that move away from the global best have their inertia weight reduced, allowing them to break free from the influence of their previous velocity and be pulled more strongly toward the global best position. This mechanism preserves the exploration capability while promoting convergence toward the optimal solution. The inertia weight in IAPSO is defined as follows:

$$\omega = \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{dist_i}{max_dist}\right) \tag{26}$$

$$dist_{i} = \left(\sum_{j=1}^{D} (Gbest_{j} - \theta_{i,j})^{2}\right)^{T}$$

$$max_{dist} = \max(dist_{i})$$
(27)
(28)

Here,
$$\omega_0$$
 is the initial inertia weight, which is randomly selected within the range [0.5,1]. *dist*_i represents the current Euclidean distance of the *i*th particle and is defined as the distance between the particle and the global best position. *max_dist* denotes the maximum distance of any particle from the global best position in the current generation

The second major improvement of IAPSO is the addition of an adaptive momentum term to the position update equation in classical PSO. This momentum term is controlled by a randomly selected ρ parameter and takes a value in the range of 0.75 to 1.25 at each iteration, dynamically adjusting the contribution of the particle's previous position to its updated position. This mechanism allows the particle to move more freely in the search space by reducing the influence of its previous position in some cases, while in others, it reinforces the particle's current trajectory. Thus, the risk of premature convergence is reduced, and an adaptive balance is achieved. The position update equation is defined as follows. Here, ρ is a randomly selected value in the range of [-0.25,0.25].

$$\theta_{i,j}(t+1) = (1-\rho) \cdot \theta_{i,j}(t) + V_{i,j}(t+1)$$
(29)

APSO is a PSO variant that stands out with its dynamic inertia weight and adaptive repositioning mechanism. In traditional PSO, the inertia weight is considered either as a fixed parameter or as one that changes based on iterations, whereas in APSO, it is dynamically determined according to each particle's
fitness value. This allows particles closer to a better solution to move more slowly, while those farther away engage in more aggressive exploration, covering larger regions of the search space. The adaptive update of the inertia weight is expressed as follows. Here, *Rank_i* represents the ranking of the particle's fitness score within the population, and *N* denotes the total number of particles

$$\omega_i = \omega_{min} + (\omega_{max} - \omega_{min}) \cdot \frac{Rank_i}{N}$$
(30)

Another significant improvement in APSO is the random repositioning of the worst particles, as defined in Equation (31), if the global best fitness value remains unchanged for a certain period. This process aims to increase diversity within the population and prevent premature convergence

$$f(Gbest_{t-5}) - f(Gbest_t) < thrs \to select \ \theta_{worst,1}, \theta_{worst,2}, \dots \theta_{worst,Z}$$

$$\theta_{worst,1} = \theta_{rand,1}, \theta_{worst,2} = \theta_{rand,2} \dots \theta_{worst,Z} = \theta_{rand,Z}$$
(31)

Here, f(Gbest) represents the fitness value of the global best solution. If the change in this value remains below a certain threshold for five consecutive iterations, the worst *Z* particles in the population are selected. The positions of these selected particles are then replaced with newly generated random positions (θ_{rand}).

The conducted tests demonstrate that IAPSO achieves successful results compared to classical PSO, thanks to its dynamic inertia weight determination and momentum-based position update strategies. In particular, the Median and standard deviation (Std) metrics of the best fitness values obtained from independent runs confirm the effectiveness of the proposed improvements. However, the observation of weaker-than-expected results in some runs and the wide variation in fitness values indicate that the algorithm needs further improvements in terms of stability. This issue is believed to stem from IAPSO's fixed acceleration coefficient approach.

In this context, a new hybrid PSO variant has been proposed to address the inconsistencies in IAPSO's performance distribution while preserving its dynamic inertia weight determination and momentumbased position update strategies. This hybrid approach incorporates the adaptive acceleration coefficient adjustment strategy used in MPSOTVAC. Additionally, to further reduce the risk of premature convergence, APSO's reinitialization mechanism has also been integrated into the hybrid model. With the inclusion of this hybrid PSO variant, the total number of variants evaluated in the comparative analysis has increased to eight.

4. Results and Discussion

In this study, the effectiveness of eight different PSO variants in solving complex SHE equations was compared, and the impact of these improvements on the capability of standard PSO in real-world engineering problems was evaluated. The first of these variants is the original PSO algorithm (SPSO) without inertia weight, while six of them are existing variants in the literature that have incorporated various enhancements into the original version. The final variant is the proposed hybrid model, which selectively integrates the strong aspects of some successful variants to achieve a more balanced and robust optimization approach

The common goal of all variants is to determine the optimal switching angles by minimizing the fitness function defined in Equation (12). This function is designed to eliminate dominant harmonics up to the 14th order (excluding even harmonics and multiples of three) in the inverter output voltage while keeping the fundamental component amplitude as close as possible to the desired reference value. For all algorithms, the maximum number of iterations (*T*) is set to 100, the population size (*N*) is 50, the reference

fundamental component amplitude (V_{1ref}) is 250 V (433.01 V for line voltage), and the maximum and minimum velocity limits of the particles (v_{min} , v_{max}) are set to [-1,1]. The fixed parameters specific to other variants are given in Table 1.

	Table 1. Parameters of the FSO variants.
Variant	Parameter
SPSO	$C_{1,2} = 0.75$
PSOCIW	$C_{1,2} = 0.75, \omega = 0.7$
PSOTVIW	$C_{1,2} = 0.75, \omega_{min,max} = (0.4, 0.9)$
PSORIW	$C_{1,2} = 0.75$
APSO	$C_{1,2} = 0.75, \omega_{min,max} = (0.4, 0.9), Z = 5, thrs = 1$
IAPSO	$C_{1,2} = 0.75, \ \rho = [-0.25, 0.25]$
MPSOTVAC	$C_{1,2min} = 0.25, C_{1,2max} = 1.25, \omega_{min,max} = (0.4, 0.9), pm = 0.1, m = 5$
Proposed	$C_{1,2min} = 0.25, C_{1,2max} = 1.25, \omega_{min,max} = (0.4, 0.9), \rho = [-0.25, 0.25], Z = 5, thrs = 1$

Table 1. Parameters of the PSO variants

For each variant, 501 independent runs were conducted, and the best fitness values obtained from each run were recorded. Among these, the Best, Median, and Worst fitness values, along with their standard deviations for each variant, were determined and presented in Table 2. Additionally, to visualize the distribution of these values and better highlight the performance differences between the variants, a box plot was generated and shown in Figure 3a. Furthermore, to analyze the performance of the last three variants in more detail, a second box plot was created, including only these three variants, and presented in Figure 3b.

Table 2. Optimization results of PSO variants							
DCO Veriente	Statistical Summary of Fitness Values						
PSO Variants -	Best	Median	Worst	Std			
SPSO	4.3234	64.6005	288.1462	47.7406			
PSOCIW	7.53E-06	39.8323	261.7193	43.4600			
PSOTVIW	3.63E-05	26.6706	259.5298	42.3202			
PSORIW	7.01E-06	27.2649	262.5894	42.8051			
APSO	7.71E-05	26.4647	181.8058	32.6880			
IAPSO	0.2290	3.1401	141.3887	11.1067			
MPSOTVAC	1.44E-05	19.7548	133.2802	26.5570			
Hybrid	0.2895	2.6952	29.1667	4.4168			



Figure 3. Boxplot graphic of (a) all PSO variants, (b) last 3 variants

Upon examining the box plots and Table 2, the first noticeable point is that the inclusion of inertia weight significantly enhances optimization performance. Variants with inertia weight achieve better results across all metrics (Best, Median, Worst, and Std) indicating not only improved solution quality but also greater stability compared to standard PSO.

Another important observation from the results is that there is no significant performance difference among PSOCIW, PSOTVIW, and PSORIW. Although PSORIW achieved the best result in the Best metric among all variants, this outcome is possibly due to the stochastic nature of the algorithm and is not statistically meaningful, with only a slight improvement over the others. In the Median metric, PSOTVIW and PSORIW exhibited slightly lower values than PSOCIW. Overall, the presence of inertia weight led to better results in all three algorithms compared to standard PSO. However, considering the method of determining inertia weight, the slightly higher Median value of PSOCIW suggests that dynamically changing inertia weight approaches improve solution quality more effectively The obtained results indicate that the additional improvements of APSO did not provide a significant advantage in the context of this optimization problem in terms of Best and Median metrics. Nevertheless, in the Worst metric, APSO achieved a lower error value compared to other methods and exhibited a relatively better performance in the worst-case scenarios. Furthermore, its lower standard deviation suggests that the algorithm reduces solution variability and operates more stably. However, this stability is associated with a narrower distribution of solutions rather than an overall improvement in solution quality

In general, when the results are examined, it is observed that the last three variants (IAPSO, MPSOTVAC, and the proposed Hybrid) have demonstrated significantly better performance compared to the first five variants, except for the Best metric. However, since the Best metric can exhibit substantial variations across different runs, it is not considered a reliable standalone criterion for evaluating the overall performance of the algorithms. In contrast, these three algorithms, which produced lower values in the Median, Worst, and Std metrics, not only generated better solutions during the optimization process but also improved the consistency of these solutions, demonstrating a competitive performance. These findings indicate that the applied enhancements have improved optimization performance and that these three methods explore the search space more efficiently.

IAPSO has demonstrated a significant improvement in the Median and Std metrics compared to the first five variants and has also produced better results than MPSOTVAC. Although the difference between IAPSO and MPSOTVAC is smaller than that observed with the other variants, it is still noteworthy. In the Worst metric, an improvement has been achieved compared to the first five variants; however, this difference is relatively small, and IAPSO remains slightly behind MPSOTVAC.

On the other hand, when examining the box plot, it is evident that IAPSO has a considerable number of outliers. This indicates that while the algorithm produces very good results in some runs, it yields unexpectedly high fitness values under certain conditions. Despite these fluctuations, IAPSO stands out as a strong alternative alongside the proposed hybrid variant for solving SHE equations, particularly due to the improvements it provides in the Median and Std metrics.

When evaluating its overall performance, MPSOTVAC demonstrates significantly better results compared to the first five variants. Although MPSOTVAC achieved the best value among the last three variants in the Best metric, this comparison is of limited significance due to the reasons discussed earlier. In the Worst metric, it also performed better than IAPSO; however, the difference is not substantial. Therefore, while MPSOTVAC delivers a relatively acceptable performance in solving SHE equations, it falls behind the proposed hybrid variant and IAPSO.

The proposed hybrid variant integrates three powerful improvement strategies under a single framework: the adaptive momentum term added to the position update equation in IAPSO, the time-varying acceleration coefficients from MPSOTVAC, and the reinitialization mechanism from APSO. Examining the results, the proposed hybrid variant has produced the most consistent and high-quality results across all performance metrics. Its lowest Median value among all variants indicates that it consistently generates higher-quality solutions. Additionally, its superior performance in the Worst metric demonstrates that it maintains acceptable optimization performance even in unfavorable scenarios. The low Std value confirms that the solution quality remains stable, indicating that the algorithm provides consistent performance. Boxplots reveal that while the proposed hybrid variant has outliers, these values are more concentrated within a narrower range compared to other algorithms, minimizing extreme deviations. This suggests that the algorithm reduces variability among solutions and minimizes performance fluctuations.

The convergence curves of the last three variants are presented in Figure 4 to further analyze their optimization behavior in addition to their overall performance. Upon examining the curves, it is observed that IAPSO, MPSOTVAC, and the Hybrid variant all successfully converged toward the global best

solution. However, differences can be seen in terms of convergence speed, stability, and improvement in solution quality.



Figure 4. Convergence curves of the last 3 variants (a) normal, (b) magnified view

IAPSO exhibited a rapid decline in the early iterations due to its fixed acceleration coefficients, aggressively steering towards the best solution. However, maintaining fixed acceleration coefficients caused the algorithm to lose flexibility in later iterations, leading to a solution quality inferior to that of the Hybrid variant.

MPSOTVAC demonstrated a more stable decreasing trend thanks to its mechanism for adjusting acceleration coefficients based on iterations. However, its inertia weight update strategy was not as effective as that of IAPSO, and the algorithm lagged behind both IAPSO and the Hybrid variant in terms of solution quality.

The Hybrid variant, built upon the strong foundation of IAPSO, incorporated MPSOTVAC's controlled acceleration coefficient adjustment strategy, effectively balancing exploration and exploitation, making it the most efficient algorithm in the convergence process. Initially, it prioritized a broader exploration phase, which resulted in a slower convergence rate compared to IAPSO in the early iterations. However, in later iterations, it transitioned into a more aggressive exploitation phase, achieving the highest solution quality and surpassing the other two variants.

Overall, while all three algorithms exhibited a successful optimization process, the Hybrid variant delivered the most stable and best-performing results. IAPSO gained an early advantage in the initial iterations but fell behind the Hybrid variant due to its fixed acceleration coefficients. Meanwhile, MPSOTVAC showed a steady decline but remained the weakest variant among the three in terms of solution quality.

To validate the results obtained in the optimization processes, the optimal switching angles obtained by the last three variants for each performance metric were recorded (Table 3) and applied to a three-phase 11-level CHB-MLI model in MATLAB/Simulink. As a result of the simulation, the Total Harmonic Distortion (THD) up to the 14th order and the fundamental component amplitude errors of the inverter output voltage were calculated (Table 4)

Additionally, to visually evaluate the performance of the algorithms, inverter line voltages, their fundamental components along with their desired reference counterparts, and frequency spectrums showing other dominant harmonics are presented in the following figures. Among these, Figure 5 presents the results obtained by applying the switching angles produced by PSO variants in the Best criterion, Figure 6 in the Median criterion, and Figure 7 in the Worst criterion

PSO	Perfor.	Fitness	Optimal Switching Angles (θ)				
Variants	Metrics	Scores	θ_1	θ_2	θ_3	$ heta_4$	θ_5
	Best	0.22896	8.0723	19.5195	29.5207	47.7187	63.1720
IAPSO	Median	3.14005	8.3307	19.1536	28.9665	47.2366	63.1539
	Worst	141.389	6.9622	38.0693	88.4607	89.2185	89.4513
MPSOTVAC	Best	1.44E-05	7.8621	19.3727	29.6524	47.6809	63.2109
	Median	19.7548	5.2253	24.5971	38.9990	49.6409	72.9554
	Worst	133.280	8.1392	37.0757	87.6129	89.0261	89.9973
Hybrid	Best	0.28952	8.1324	19.4678	29.7515	47.7013	63.0676
	Median	2.69516	8.5098	18.7479	29.5546	48.2781	62.9309
	Worst	29.1667	15.9531	24.2180	41.6987	59.2115	61.7156

Table 3. Optimal switching angles found by the last 3 PSO variants

Table 4. Simulation results of last 3 PSO variants

	% THD (Until 14 th)			% Voltage Error of V1			
Perfor.	IAPSO	MPSO	Hubrid	IAPSO	MPSO	Hubrid	
Metrics	IAF 50	TVAC		IAP 50	TVAC	Tryblid	
Best	0.19	0.01	0.22	-0.09	-0.09	-0.09	
Median	0.61	0.27	0.66	0.23	-7.83	-0.12	
Worst	2.41	0.77	1.29	-53.44	-53.03	-8.27	

Upon examining the simulation results, in the Best criterion, all three algorithms produced fundamental component amplitudes that were very close to the target value. However, in terms of THD, MPSOTVAC (0.01) achieved the lowest value by a large margin, making it the most successful approach. In contrast, the Hybrid (0.22) and IAPSO (0.19) variants produced significantly higher THD values compared to MPSOTVAC but remained very close to each other. This indicates that the low fitness value of MPSOTVAC in the Best criterion is largely due to its superior THD minimization capability.

In the Median criterion, MPSOTVAC once again achieved the lowest THD value. However, this was accomplished at the expense of fundamental component amplitude accuracy. The error rate (-7.83%) was significantly higher compared to the Hybrid (-0.12%) and IAPSO (0.23%) variants. The Hybrid and IAPSO algorithms also produced very similar results in this criterion in terms of both THD and fundamental component amplitude error. While one exhibited slightly higher THD, the other had a marginally larger fundamental component amplitude error.

In the Worst criterion, the differences between the algorithms became most pronounced. In this scenario, the clear superiority of the proposed Hybrid variant was evident. MPSOTVAC maintained its tendency to achieve the lowest THD value. However, while achieving this optimization success, it suffered a significant reduction in the fundamental component voltage, nearly halving the voltage value. IAPSO exhibited the weakest performance in this criterion. It produced the worst results in terms of both THD and fundamental component amplitude, displaying severe instability during the optimization process.



Figure 5. Line voltage waveform, fundamental harmonic and its reference, frequency spectrum of **(a)** IAPSO; **(b)** MPSOTVAC; **(c)** Hybrid variants at Best metric

In contrast, the Hybrid variant, even in the worst-case scenario, only produced a -8.27% fundamental component amplitude error, which is at a level that MPSOTVAC could only achieve in the Median criterion. The THD value of the Hybrid variant in this criterion increased slightly compared to the previous scenarios, falling behind MPSOTVAC. However, it should be noted that MPSOTVAC achieved this low THD value at the cost of a significant drop in the fundamental component voltage.

Overall, the conducted analyses clearly highlight the strengths and weaknesses of the algorithms. IAPSO, although generally a successful algorithm that produced low fitness values, showed instability in some runs, resulting in suboptimal outcomes. Indeed, its poor performance in the Worst criterion confirmed this, as previously indicated by the broad distribution and high standard deviation (Std) values observed in the box plot.



Figure 6. Line voltage waveform, fundamental harmonic and its reference, frequency spectrum of **(a)** IAPSO; **(b)** MPSOTVAC; **(c)** Hybrid variants at Median metric

MPSOTVAC produced an outstanding result in the Best criterion in terms of both THD and fundamental component amplitude. However, its success in achieving low THD in other criteria came at the expense of fundamental component amplitude errors that reached unacceptable levels in the Median and especially the Worst criteria. This suggests that while MPSOTVAC has the potential to produce excellent results, this success cannot always be achieved consistently.

The proposed Hybrid variant was developed precisely due to IAPSO's vulnerability to such instabilities, despite its generally strong performance, and the simulation results validated the correctness of this approach. While the Hybrid variant exhibited an average performance in the Best and Median criteria, it achieved the most successful results by far in the Worst criterion, demonstrating its overall stability.



Figure 7. Line voltage waveform, fundamental harmonic and its reference, frequency spectrum of **(a)** IAPSO; **(b)** MPSOTVAC; **(c)** Hybrid variants at Worst metric

5. Conclusion

In this study, the capabilities of eight different PSO variants in solving complex SHE equations were compared, and the impact of the proposed improvements on the performance of standard PSO in real-world engineering problems was evaluated. The evaluated variants include the original version of PSO (SPSO), existing enhanced versions from the literature, and the proposed hybrid model, which integrates selected strong features from some of the most effective variants.

The first and most fundamental improvement introduced to PSO is the addition of an inertia weight. This component regulates the balance between exploration and exploitation during the optimization process, allowing the algorithm to produce more stable and successful results. However, using inertia weight alone has proven insufficient, approaches that lack complementary mechanisms have failed to consistently deliver the desired performance in certain cases.

The findings of the study indicate that three variants stand out in terms of performance. IAPSO, with its dynamic inertia weight adjustment and momentum-based position update mechanism, has generally produced successful solutions. However, it has exhibited instability in some runs, leading to unexpectedly

poor results. This inconsistency suggests that IAPSO may suffer from solution quality fluctuations, making it unreliable across all scenarios.

MPSOTVAC, which modifies acceleration coefficients based on iteration count, has achieved the best results in some runs but has failed to maintain this success consistently. In particular, it has shown large deviations in fundamental component amplitude, resulting in an overall unstable performance.

The proposed hybrid PSO variant builds upon the strengths of IAPSO while integrating MPSOTVAC's controlled acceleration coefficient adaptation mechanism and APSO's reinitialization strategy. The results demonstrate that the hybrid variant is not only effective in specific cases but also emerges as the most stable and reliable algorithm overall. It has consistently generated the highest-quality solutions on average while maintaining competitive performance even in worst-case scenarios.

This study provides a comprehensive evaluation of the strengths and weaknesses of different PSO variants, serving as an important reference for future research. Furthermore, the findings highlight that the optimization performance of standard PSO can be significantly improved through appropriate modifications, with the proposed hybrid approach achieving the best balance. The results also suggest that advanced PSO variants can serve as an effective alternative for solving complex engineering problems such as SHE equations.

Conflict of Interest

The author declares that he has no conflict of interest.

References

- [1] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory. MHS95 Proc Sixth Int Symp Micro Mach Hum Sci [Internet]. 1995 [cited 2025 Mar 17]. p. 39–43. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/494215.
- [2] Gad AG. Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review. Arch Comput Methods Eng. 2022;29(5):2531–2561.
- [3] Xu H, Deng Q, Zhang Z, et al. A hybrid differential evolution particle swarm optimization algorithm based on dynamic strategies. Sci Rep. 2025;15(1):4518.
- [4] Shaqarin T, Noack BR. A Fast-Converging Particle Swarm Optimization through Targeted, Position-Mutated, Elitism (PSO-TPME). Int J Comput Intell Syst. 2023;16(1):6.
- [5] Jain M, Saihjpal V, Singh N, et al. An Overview of Variants and Advancements of PSO Algorithm. Appl Sci. 2022;12(17):8392.
- [6] Zhan Z-H, Zhang J, Li Y, et al. Adaptive Particle Swarm Optimization. IEEE Trans Syst Man Cybern Part B Cybern. 2009;39(6):1362–1381.
- [7] Chauhan P, Deep K, Pant M. Novel inertia weight strategies for particle swarm optimization. Memetic Comput. 2013;5(3):229–251.
- [8] Fan S-KS, Chiu Y-Y. A decreasing inertia weight particle swarm optimizer. Eng Optim. 2007;39(2):203–228.
- [9] Feng Y, Yao Y-M, Wang A-X. Comparing with Chaotic Inertia Weights in Particle Swarm Optimization. 2007 Int Conf Mach Learn Cybern [Internet]. 2007 [cited 2025 Feb 23]. p. 329–333. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4370164.
- [10] Yang K, Zhang Q, Zhang J, et al. Unified Selective Harmonic Elimination for Multilevel Converters. IEEE Trans Power Electron. 2017;32(2):1579–1590.
- [11] Dahidah MSA, Konstantinou G, Agelidis VG. A Review of Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM: Formulations, Solving Algorithms, Implementation and Applications. IEEE Trans Power Electron. 2015;30(8):4091–4106.

- [12] Yang K, Yuan Z, Yuan R, et al. A Groebner Bases Theory-Based Method for Selective Harmonic Elimination. IEEE Trans Power Electron. 2015;30(12):6581–6592.
- [13] Bertin T, Despesse G, Thomas R. Comparison between a Cascaded H-Bridge and a Conventional H-Bridge for a 5-kW Grid-Tied Solar Inverter. Electronics. 2023;12(8):1929.
- [14] Mao W, Zhang X, Hu Y, et al. A Research on Cascaded H-Bridge Module Level Photovoltaic Inverter Based on a Switching Modulation Strategy. Energies. 2019;12(10):1851.
- [15] Lingom PM, Song-Manguelle J, Nyobe-Yome JM, et al. A Comprehensive Review of Compensation Control Techniques Suitable for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Operation with Unequal DC Sources or Faulty Cells. Energies. 2024;17(3):722.
- [16] Sharma B, Manna S, Saxena V, et al. A comprehensive review of multi-level inverters, modulation, and control for grid-interfaced solar PV systems. Sci Rep. 2025;15(1):661.
- [17] Memon MA, Mekhilef S, Mubin M, et al. Selective harmonic elimination in inverters using bioinspired intelligent algorithms for renewable energy conversion applications: A review. Renew Sustain Energy Rev. 2018;82:2235–2253.
- [18] Zhang H, Li D. Applications of computer vision techniques to cotton foreign matter inspection: A review. Comput Electron Agric. 2014;109:59–70.
- [19] Bektaş Y, Karaca H, Taha TA, et al. Red deer algorithm-based selective harmonic elimination technique for multilevel inverters. Bull Electr Eng Inform. 2023;12(5):2643–2650.
- [20] Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer. 1998 IEEE Int Conf Evol Comput Proc IEEE World Congr Comput Intell Cat No98TH8360 [Internet]. 1998 [cited 2025 Feb 23]. p. 69–73. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/699146.
- [21] Shi Y, Eberhart RC. Empirical study of particle swarm optimization. Proc 1999 Congr Evol Comput-CEC99 Cat No 99TH8406 [Internet]. 1999 [cited 2025 Feb 23]. p. 1945-1950 Vol. 3. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/785511.
- [22] Eberhart RC, Shi Y. Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms. Proc 2001 Congr Evol Comput IEEE Cat No01TH8546 [Internet]. 2001 [cited 2025 Feb 23]. p. 94–100 vol. 1. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/934376.
- [23] Feng Y, Teng G-F, Wang A-X, et al. Chaotic Inertia Weight in Particle Swarm Optimization. Second Int Conf Innov Comput Informatio Control ICICIC 2007 [Internet]. 2007 [cited 2025 Feb 23]. p. 475– 475. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/4428117.
- [24] Qin Z, Yu F, Shi Z, et al. Adaptive Inertia Weight Particle Swarm Optimization. In: Rutkowski L, Tadeusiewicz R, Zadeh LA, et al., editors. Artif Intell Soft Comput – ICAISC 2006. Berlin, Heidelberg: Springer; 2006. p. 450–459.
- [25] Arumugam MS, Rao MVC. On the performance of the particle swarm optimization algorithm with various inertia weight variants for computing optimal control of a class of hybrid systems. Discrete Dyn Nat Soc. 2006;2006(1):079295.
- [26] Yang X, Yuan J, Yuan J, et al. A modified particle swarm optimizer with dynamic adaptation. Appl Math Comput. 2007;189(2):1205–1213.
- [27] Jiao B, Lian Z, Gu X. A dynamic inertia weight particle swarm optimization algorithm. Chaos Solitons Fractals. 2008;37(3):698–705.
- [28] Ratnaweera A, Halgamuge SK, Watson HC. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients. IEEE Trans Evol Comput. 2004;8(3):240–255.
- [29] Panigrahi BK, Ravikumar Pandi V, Das S. Adaptive particle swarm optimization approach for static and dynamic economic load dispatch. Energy Convers Manag. 2008;49(6):1407–1415.
- [30] Suresh K, Ghosh S, Kundu D, et al. Inertia-Adaptive Particle Swarm Optimizer for Improved Global Search. 2008 Eighth Int Conf Intell Syst Des Appl [Internet]. 2008 [cited 2025 Mar 17]. p. 253–258. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/4696340.



Adıyaman University Journal of Engineering Sciences Adyü J Eng Sci 2025;12(25):113-131 Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Adyü Müh Bil Derg 2025;12(25):113-131

https://doi.org/10.54365/adyumbd.1651055

Research Article / Araștırma Makalesi

A Comparative Study of DQ and CSD Methods for Voltage Regulation in DSTATCOM-Based SEIG Systems

DSTATCOM Tabanlı KUAG Sistemlerinde Gerilim Regülasyonu için DQ ve CSD Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Çalışması

Ali Sait Özer 1* D, Hulusi Karaca

¹ Konya Technical University, Department of Control and Automation Technology, Konya, Türkiye ² Selçuk University, Department of Control and Automation Technology, Konya, Türkiye

Abstract

Self-Excited Induction Generator (SEIG) plays an important role in independent power generation systems. Since SEIGs have difficulty maintaining the terminal voltage when load conditions change, an adequate compensation and control system is required. Distribution Static Compensators (DSTATCOMs) stand out with their fast dynamic response, reactive power support, and harmonic capabilities. The performance reduction of DSTATCOMs depends on the effectiveness of the control method. In this study, the performance of the widely used dq method and Current Synchronous Detection (CSD) method is compared under nonlinear loads, unbalanced loads, and DC offset conditions. The CSD method stands out with its effectiveness in filtering PCC voltages, peak estimation, and simple structure. The dq method, thanks to its high accuracy and stability in phase synchronization, provided successful has performance in harmonic suppression, current and voltage balancing, and reduction of DC offset effects. In both methods, the total harmonic distortion (THD) of SEIG current and voltage is below 5% in accordance with IEEE-519 standards.

Keywords: Self-Excited Induction Generator (SEIG), Distribution Static Compensators (DSTATCOM), Wind energy Öz

Kendinden Uyarımlı Asenkron Generatör (KUAG), bağımsız güç üretim sistemlerinde, önemli bir rol oynamaktadır. SEIG'ler yük koşulları değiştiğinde terminal gerilimini korumakta zorluk çektiği için etkili bir kompanzasyon kontrol sistemine ihtiyaç ve duyulmaktadır. Dağıtım Statik Kompanzatörleri (DSTATCOM) hızlı dinamik tepkileri, reaktif güç desteği ve harmonik azaltma yetenekleri ile ön plana çıkmaktadır. DSTATCOM'ların performansı kontrol yönteminin etkinliğine bağlıdır. Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan dq yöntemi ile Akım Senkron Algılama (CSD) yönteminin performansı doğrusal olmayan yükler, dengesiz yükler ve DC ofset koşulları altında karşılaştırılmıştır. CSD yöntemi, PCC gerilimlerini filtrelemedeki etkinliği, tepe değerini tahmin etmesi ve basit algoritması ile öne çıkmaktadır. Ayrıca akım ve gerilimlerde meydana gelen DC ofset durumlarında faz gerilimi kestirimi daha üstündür. dq yönteminde ise faz senkronizasyonundaki yüksek doğruluk ve kararlılığı sayesinde harmonik bastırma, akım ve gerilim dengeleme ve DC ofset etkilerini azaltmada başarılı performans sağlamıştır. Her iki yöntemde de IEEE-519 standartlarına uygun şekilde SEIG akım ve geriliminin toplam harmonik distorsiyonu (THD) %5'in altındadır.

Anahtar Kelimeler: Kendinden Uyartımlı Asenkson Generatör (KUAG), Dağıtım Statik Kompansatörleri (DSTATCOM), Rüzgâr enerjisi

^{*} Corresponding e-mail (Sorumlu yazar e-posta): <u>asozer@ktun.edu.tr</u> **Received (Geliş Tarihi):**04.03.2025, **Accepted (Kabul Tarihi):** 11.04.2025

1. Introduction

Wind energy systems are one of the fastest growing and widespread systems among renewable energy sources. Wind energy is gaining more and more importance day by day due to its environmentally friendly structure, reducing carbon emissions caused by fossil fuels, and contributing to sustainable energy production[1]. In wind turbines, asynchronous (induction) generators, synchronous generators, and permanent magnet generators are generally preferred according to system performance, efficiency, and cost issues. Induction generators preferred in off-grid systems are called self-excited induction generators (SEIG) [2].

SEIGs are characterized by a robust squirrel cage rotor structure, low maintenance costs, the absence of slip rings and brushes, self-protection against faults, and good dynamic response[3]. However, one of the most significant disadvantages of SEIGs is that their terminal voltages fluctuate if the required reactive power is not provided as the load [4]. Moreover, when the load is high, the terminal voltage can drop significantly, causing the SEIG to become unstable and its voltage to collapse[5]. The reactive power required for the SEIG to generate voltage at the starting moment is provided by capacitor banks connected to the terminals. An efficient voltage regulation system is required to ensure that the SEIG voltage is stable and regular. Power electronic converter-based systems, especially Static Var Compensator (SVC) and Distribution Static Compensator (DSTATCOM) systems, are widely used for this purpose. Although researchers have widely proposed SVC-based methods based on controlled switching of capacitor banks, SVCs do not adapt to dynamic load changes due to their long response times, which reduces their performance under load conditions with load imbalance and harmonic currents[6]. Because the reactive power provided by SVCs depends on the terminal voltage, and the capacity to provide reactive power decreases during sudden voltage drops[7]. This negatively affects system stability, and even SEIG may become unable to produce voltage. Due to these limitations, DSTATCOM stands out as the advanced dynamic performance under changing load conditions.

DSTATCOM emerges as an important alternative in SEIG-based systems, as it provides stable system operation with fast and dynamic reactive power support. It effectively regulates voltage, especially under load imbalances and load conditions containing harmonics, and increases system reliability by responding quickly to sudden voltage drops [8], [9].

The effectiveness of DSTATCOM's performance depends on the control method used. In this context, the Synchronous Reference Frame (SRF or dq) method [10] and the Current Synchronous Detection (CSD) method are prominent control strategies. Researchers have modified the CSD method to filter the phase voltages with the SOGI method [6].

The dq method transforms sinusoidal current and voltage expressions into d-q axes to provide the required active and reactive powers. Due to its precise phase synchronization capabilities, this method provides high accuracy and stability in voltage regulation, harmonic suppression, and load balancing [11]. On the other hand, the CSD method offers a more straightforward and faster control structure by using direct current signals without requiring additional transformations such as dq. This approach provides an advantage in providing a fast response to sudden load changes. In addition, filtering the PCC voltages through the SOGI allows for a more precise determination of the PCC peak voltages.

In this study, the performance of the dq method and the SOGI-based CSD method developed for voltage control in DSTATCOM-based SEIG systems are compared under nonlinear loads, unbalanced loads, and DC offset conditions. Since the phase voltages are filtered separately in the SOGI-CSD method, it showed superior performance in estimating the peak values of PCC voltages under nonlinear load and unbalanced load conditions. Accordingly, SEIG currents and voltages are produced properly despite the unbalanced and harmonic load conditions.



Figure 1. Schematic of DSTATCOM-based SEIG system.

Since the control scheme has no DC offset immunity, the performance of the SOGI-CSD control method is limited in estimating the peak values of PCC. Therefore, the effects of DC offset are reflected in the SEIG currents and voltages and cause limited unbalance. In addition, oscillations occurred in the DC bus voltage. However, these oscillations do not prevent DSTATCOM from providing the desired reactive power.

On the other hand, the dq method effectively meets the reactive power demands. It provides fast responses to dynamic load changes and harmonic distortions thanks to its sensitive phase synchronization. Therefore, even under changing load conditions, SEIG currents and voltages are produced in a balanced and smooth manner. Similarly, in the dq method, oscillations occur in the estimation of the PCC peak value in DC offsets occurring in current and voltage. It is observed that these oscillations were more significant than in the CSD method.

On the other hand, it is observed that SEIG currents and voltages are produced in a balanced and smooth manner with less effect from DC offset in the dq method. It is also determined that the oscillation in the DC bus voltage is lower, unlike the CSD method. When the THD ratios of currents and voltages are examined, although the values are close to each other, the dq method gives better results. However, both methods provide satisfactory performance by keeping the current and voltage THD values below the IEEE-519-2014 standard limits.

2. DSTATCOM-Based SEIG System

Fig. 1 shows the structure of the SEIG-STATCOM system. SEIGs are usually driven by rotating machines such as wind turbines to generate electricity. For the SEIG to initially generate voltage, fixed capacitor banks connected in parallel to the terminals are required. These capacitors are selected to generate the nominal voltage at no load and help the SEIG generate its magnetic field.

DSTATCOM is a power electronic device designed to regulate the SEIG's voltage and improve system stability. As shown in the figures, it mainly consists of IGBT modules and a DC capacitor. STATCOM is connected to the PCC (Point of Common Coupling) via coupling inductors and works integrated with the system.



Figure 2. Representation of the dq method

3. DSTATCOM Control Methods

3.1. dq Based Method

The dq method, which is used to meet critical needs such as harmonic suppression, active and reactive power control in three-phase power systems, stands out especially with its ability to respond quickly and stably to dynamic load changes. The block diagram of the dq method is shown in Fig. 2.

In the dq method, load currents (i_{labc}), SEIG terminal voltages (v_{abc}), and DC bus voltage (V_{dc}) must be measured. These measured signals are used in the system as feedback signals. The *abc-dq* conversion process is applied to convert the load current components from the synchronous reference frame to the dq reference frame.

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 120) & \cos(\omega t + 120) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - 120) & \sin(\omega t + 120) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix}$$
(1)

 i_{Ldr} , i_{Lq} has both fundamental and harmonic components. LPF is used to purify these currents from harmonics. The fundamental components of the LPF output are expressed as i_d , i_q follows.

The Phase Locking Loop (PLL) provides the phase angle (θ) information required for the conversion from abc to dq plane and vice versa. Furthermore, the dq-based method consists of two PI controllers. One of these PI controllers is used to keep the DC bus voltage constant and stable, and the other one is used to keep the terminal voltage of the SEIG stable. In DSTATCOM, a certain level of active current is required to maintain the DC bus voltage; otherwise, the DC bus voltage may drop over time, and the system may lose stability. The active component (i_{sd}) is used to regulate the DC bus voltage. This component is calculated with the help of i_d and i_q components. For the active component current (i_{sd}), the measured DC bus voltage (V_{dc}) is compared with the reference voltage value (V_{dcref}) and the error signal resulting from this voltage difference is transmitted as input to the PI controller. The DC bus voltage error is expressed as follows:

$$V_{dcer(n)} = V_{dcref(n)} - V_{dc(n)}$$
⁽²⁾

The output of the PI controller gives the i_{loss} value, which is calculated as follows:

$$i_{loss(n)} = i_{loss(n-1)} + K_{pd} (V_{dcer} - V_{dcer(n-1)}) + K_{id} V_{dcer(n)}$$
(3)

The active component i_{sd} , is calculated using the value of i_{loss} , which is generated at the output of the PI controller, as shown in Eq. (4).

$$i_{sd} = \frac{i_{db} + \overline{i_d}}{3} \tag{4}$$

To prevent the voltage drop of the SEIG, the necessary reactive power must be supplied. To control the amplitude of the SEIG's voltage, the reactive component of the source reference currents $(i_{sa}^*, i_{sb}^*, i_{sc}^*)$, denoted as i_{sq} , is used. For this purpose, the peak value of the SEIG's voltage must first be calculated. The peak amplitude of the SEIG's voltage is determined as follows:

$$V_t = \sqrt{\frac{2}{3}(v_a^2 + v_b^2 + v_c^2)}$$
(5)

This value is compared with the reference value of the voltage amplitude (V_{tref}), and the resulting error is fed into the PI controller. The error for the peak voltage of the SEIG is expressed as follows:

$$V_{ter(n)} = V_{tref(n)} - V_{t(n)} \tag{6}$$

In this context, V_{tref} represents the reference SEIG voltage, and $V_{t(n)}$ corresponds to the measured instantaneous SEIG terminal voltage. The output of the PI controller provides the i_{qr} value, which is calculated as

$$i_{qr(n)} = i_{qr(n-1)} + K_{pq} (V_{ter} - V_{ter(n-1)}) + K_{iq} V_{ter(n)}$$
⁽⁷⁾

As such, K_{pq} and K_{iq} represent the proportional and integral gains of the PI controller, respectively. The reactive component of the current (i_{sq}) is obtained using the value of i_{qr} , which is generated at the output of the PI controller, as expressed in Eq. (8).

$$i_{sq} = \frac{i_{qr} + \bar{\iota_q}}{3} \tag{8}$$

The obtained i_{sd} and i_{sq} currents are used to calculate the reference source currents $(i_{sa}^*, i_{sb}^*, i_{sc}^*)$, through the dq-to-abc transformation.

$$\begin{bmatrix} i_{sa}^{*}\\ i_{sc}^{*}\\ i_{sc}^{*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1\\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1\\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd}\\ i_{sq}\\ i_{0}^{*} \end{bmatrix}$$
(9)

After generating the reference source currents (i_{sabc}^*) , they are compared with the measured currents of the SEIG (i_{sabc}) to produce the required PWM signals. These PWM signals are applied to the IGBTs to supply the necessary active and reactive power.

3.2. CSD Based Method

The Current Synchronous Detection (CSD) method is an effective technique used in SEIG-based DSTATCOM systems for voltage regulation and the extraction of reference currents. Researchers have proposed modified versions of the CSD method to enhance its performance[6]. SOGI-based CSD approaches offer significant advantages in estimating voltage peak values and ensuring precise phase alignment, making them highly suitable for such applications. Fig. 4 shows the block diagram of the SOGI based CSD method. In this theory, load currents (i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc}), SEIG currents (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}), SEIG voltages (v_{a} , v_{b} , v_{c}), and DC bus voltage (V_{dc}) are used as inputs.



Figure 3. Block Diagram of the SOGI-Based CSD Method

The CSD theory is fundamentally based on estimating the peak values of each phase voltage. In this approach, a SOGI filter is used to filter each phase individually. To calculate the peak values of the phase voltages, the phase signal itself and its 90-degree lagged version are required. In Fig. 4, the output v_a' of the SOGI represents the phase signal itself, while the output v'_{aq} provides its 90-degree lagged version. Using these outputs, the peak values of the phase voltages are calculated as follows:

$$V_{am} = \sqrt{(v_a')^2 + (v_{aq}')^2}; \quad V_{bm} = \sqrt{(v_b')^2 + (v_{bq}')^2}; \quad V_{cm} = \sqrt{(v_c')^2 + (v_{cq}')^2}$$
(10)

In three-phase systems, the instantaneous power of the load is calculated as follows by taking the product of phase voltages and phase currents:

$$P_L = v'_a i'_{La} + v'_b i'_{Lb} + v'_c i'_{Lc}$$
(11)

Here, i_{La} , i_{Lb} and i_{Lc} , represent the load currents. Since the load's active power is calculated without filtering the load currents, it contains both DC ($\overline{P_L}$) and AC ($\overline{P_L}$) components. To ensure high-quality output power from the SEIG, oscillations in the load's active power must be eliminated. A commonly used simple method for this purpose is to apply a low-pass filter (LPF). The output of the LPF is expressed as follows:

$$\overline{P_L} = P_L - \widetilde{P_L} \tag{12}$$

To prevent the drop in the DC bus voltage, the reference active power (P^*) is calculated by comparing the reference DC voltage (V_{dcref}) with the instantaneous DC voltage (Vdc). The resulting error is fed into the PI controller. The output of the PI controller provides the value of the power loss (P_{loss}). At the nth sampling instant, the DC bus voltage error, V_{dcer} , is given by.

$$V_{dcer(n)}(n) = V_{dcref}(n) - V_{dc}(n)$$
⁽¹³⁾

Here, $V_{dc(n)}$ represents the DC bus reference voltage, while $V_{dc(n)}$ denotes the measured instantaneous DC bus voltage. To maintain the DC bus voltage at the reference value, the output of the PI controller is defined as:

$$P_{loss}(n) = P_{loss}(n-1) + K_{pd} \left(V_{dcer}(n) - V_{dcer}(n-1) \right) + K_{id} V_{dcer}(n)$$
(14)

In this context, $P_{loss}(n)$ represents the active power required to compensate for the losses in the STATCOM. K_{pd} and K_{id} are the proportional and integral gain constants of the PI controller for the DC bus voltage, respectively. To obtain the reference active power (P^*), the P_{loss} value is added to the filtered active power of the load.

$$P^* = P_{Loss} + \overline{P_L} \tag{15}$$

To control the switching signals required for the IGBTs in the DSTATCOM structure, the calculation of reference currents is necessary. These reference currents consist of two components: active and reactive. The active components, used for regulating the DC bus voltage, are determined using the following expression:

$$i^{*}_{sap} = \frac{2P^{*}v'_{a}}{\bar{V}_{tm}V_{am}}; \quad i^{*}_{sbp} = \frac{2P^{*}v'_{b}}{\bar{V}_{tm}V_{bm}}; \quad i^{*}_{scp} = \frac{2P^{*}v'_{c}}{\bar{V}_{tm}V_{cm}}$$
(16)

To ensure that the terminal voltage remains at the desired reference value, it is necessary to calculate the reactive components. This begins with determining the instantaneous reactive power consumed by the load, which can be derived as shown below:

$$Q_L = v'_{aq}i'_{La} + v'_{bq}i'_{Lb} + v'_{cq}i'_{Lc}$$
(17)

The instantaneous reactive power of the load (Q_L) may exhibit oscillations due to nonlinear loads, similar to the active power. To prevent the reference currents from being affected by these oscillations, the reactive power must be filtered to eliminate such variations. A low-pass filter (LPF) is used for this purpose, and its output is represented as:

$$\overline{Q_L} = Q_L - \widetilde{Q_L} \tag{18}$$

To determine the reactive power required by both the SEIG and the load, the reference reactive power (Q^*) is necessary. The calculation of the reference reactive power requires the peak value of the SEIG's terminal voltage (V_t), which is determined as follows:

$$V_t = \frac{V_{am} + V_{bm} + V_{cm}}{3} = \frac{V_{Tm}}{3}$$
(19)

The calculated peak voltage of the SEIG (V_t) is compared with the reference peak voltage (V_t^*), and the resulting voltage error is fed into the PI controller. The voltage error of the SEIG, denoted as V_{ter} , at the nth sampling instant is expressed as:

$$V_{ter}(n) = V_{tref}(n) - V_t(n)$$
⁽²⁰⁾

The output of the PI controller provides the reactive power required by the SEIG.

$$Q_{VR}(n) = Q_{VR}(n-1) + K_{pa}(V_{ter}(n) - V_{ter}(n-1)) + K_{ia}V_{ter}(n)$$
(21)

Here, K_{pa} and K_{ia} represent the proportional and integral gain constants of the PI controller, respectively, while $V_{ter}(n)$ and $V_{ter}(n-1)$ denote the voltage errors at the nth and (n-1)th sampling instants, respectively. To obtain the reference reactive power (Q^*), the load's reactive power (Q_L) is subtracted from the reactive power required by the SEIG.

$$Q^* = Q_{VR} - \overline{Q_L} \tag{22}$$

After completing all these steps, the reactive power components of the reference currents required for switching the IGBT are determined as:

$$i^{*}_{saq} = \frac{2Q^{*}v'_{aq}}{\bar{V}_{tm}V_{am}}; \quad i^{*}_{sbq} = \frac{2Q^{*}v'_{bq}}{\bar{V}_{tm}V_{bm}}; \quad i^{*}_{scq} = \frac{2Q^{*}v'_{cq}}{\bar{V}_{tm}V_{cm}}$$
(23)

As a result, the calculated active and reactive power components are summed to derive reference currents.

$$i^{*}_{sa} = i^{*}_{sap} + i^{*}_{saq}; \quad i^{*}_{sb} = i^{*}_{sbp} + i^{*}_{sbq}; \quad i^{*}_{sc} = i^{*}_{scp} + i^{*}_{scq}$$
(24)

The reference currents (i_{sa}^* , i_{sb}^* , i_{sc}^*) are compared with the measured currents of the SEIG (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}), and the resulting error signals (e_{isa} , e_{isb} , e_{isc}) are defined accordingly. These error signals are then compared with a triangular waveform to generate the switching signals required for the DSTATCOM.

$$e_{isa} = i^*{}_{sa} - i_{sa}; \quad e_{isb} = i^*{}_{sb} - i_{sb}; \quad e_{isc} = i^*{}_{sc} - i_{sc}$$
(25)

4. Results and Discussion

In this study, the performance of a DSTATCOM-based SEIG is compared using the dq method and SOGIbased CSD. Tests are conducted under challenging scenarios commonly encountered in practical applications, including nonlinear loads, unbalanced loads, and DC offset conditions in currents and voltages. Nonlinear loads threaten the stability of electrical systems by generating harmonics, while unbalanced loads cause voltage and current imbalances between phases, significantly impacting system performance.

SEIG Parameters					
Power	15 kW				
Voltage (L-L)	400 V				
Stator resistance	0.2147 Ω				
Stator inductance	0.000991H				
Rotor resistance	0.2205 Ω				
Rotor inductance	0.000991 H				
Mutual inductance	0.06419 H				
Frequency	50 Hz				
Pole pairs	2				
Excitation capacitor bank	$C = 290 \mu F$ (Y-connected)				
DSTATCOM Parameters					
Interfacing inductor (Lf)	15 mH				
DC bus capacitor (C_{dc})	2500 μF				
Switching frequency	10 kHz				
Reactive Power Capacity	~33.96 kVAr				

Table 1. SEIG and DSTATCOM Parameters



Figure 4. Three-phase diode rectifier with capacitive filter and resistive load.

Additionally, DC offset conditions lead to saturation in measurement and control circuits, resulting in errors in voltage regulation. These test scenarios are critical for evaluating the effectiveness of control methods not only under ideal conditions but also in real-world situations where such challenges are likely to occur. The results provide a detailed assessment of the voltage regulation performance of both methods under various load and operating conditions.

4.1. Performance of DSTATCOM-based SEIG under Nonlinear Load

In the first test, a three-phase diode rectifier with a resistive load and capacitive filter is connected to the SEIG terminals as a nonlinear load (as shown in Fig. 4). Fig. 5 shows the performance of the dq method under nonlinear load conditions while Fig. 6 demonstrates the performance of the SOGI-based CSD control method under the same conditions. In these figures, the load currents (i_{Labc}), the currents injected by DSTATCOM (i_{fabc}), SEIG currents (i_{sabc}), SEIG terminal voltages (v_a , v_b , v_c), amplitude of the SEIG voltages (V_t), and the DC bus voltage (V_{dc}) are given, respectively.

As observed in Fig. 5a and 6a, nonlinear loads draw currents containing harmonics. These harmonic currents can adversely affect the SEIG currents. DSTATCOM provides the necessary compensation to prevent these harmonic contents of the load currents from impacting the SEIG currents. Consequently, the performance of the control algorithms determining these currents is of critical importance.

An effective control algorithm ensures that the SEIG currents and voltages remain balanced and sinusoidal even if the load currents contain harmonics. The currents injected by DSTATCOM are shown in Fig. 5b and 6b. Fig. 5c and 6c clearly show that the SEIG currents are balanced under both algorithms thanks to the currents injected by DSTATCOM. Similarly, Figs 5d and 6d indicate that the SEIG voltages are also balanced under these conditions.

In the dq method, the V_t value is calculated using Equation 5. Since this method uses unfiltered PCC voltages, the V_t value exhibits slight oscillations, as shown in Fig. 5e. In contrast, in the SOGI-based CSD method, the V_t value is calculated using Equation 19. Because the V_{am} , V_{bm} , and V_{cm} values used in this equation are filtered through the SOGI, the oscillations in V_t are significantly reduced, as seen in Fig. 6e. The DC bus voltage required by DSTATCOM to produce high quality voltage and current shows similar results for both methods (Fig. 5f and 6f). Approximately 2.5 V oscillation occurs in both methods. However, the DC bus value is closer to the reference in the dq method.

Fig. 7 presents the active and reactive power profiles of the load, SEIG, and DSTATCOM under nonlinear load conditions using the dq method. As observed, DSTATCOM effectively compensates for the reactive power demand and maintains power balance in the system.

Fig. 8 shows similar results for the SOGI-based CSD method, confirming its ability to support the SEIG in maintaining stable power flow under nonlinear load conditions.



Figure 5. Performance of proposed dq nethod under nonlinear load (a) Load currents, (b) DSTATCOM currents, (c) SEIG currents, (d) SEIG terminal voltages, (e) Amplitude of SEIG voltages, and (f) DC bus voltage.



Figure 6. Performance of proposed SOGIbased CSD method under nonlinear loads (a) Load currents, (b) DSTATCOM currents, (c) SEIG currents, (d) SEIG terminal voltages, (e) Amplitude of SEIG voltages, and (f) DC bus voltage.



Figure 7. Active-reactive power performance of the SEIG-DSTATCOM system under nonlinear load using dq method.



Figure 8. Active-reactive power performance of the SEIG-DSTATCOM system under nonlinear load using SOGI-CSD method.

Fig. 9 presents the THD results for the dq method, while Fig. 10 shows the THD results for the SOGI-based CSD method for nonlinear loads. In Fig. 9a, the THD of the load current is measured as 8.92%, while in Fig. 10a, it is 9.12%. Although the load remains the same, the difference in THD values of the load currents arises from the performances of the control algorithms. The control method providing better compensation for harmonic contents in voltages, indirectly affects the THD of load currents positively. The THD of SEIG currents is obtained as 3.27% in the dq method and 3.99% in the SOGI-CSD method. The THD of SEIG voltages is 1.33% for the dq method and 1.57% for the SOGI-CSD method. These results indicate that the dq method demonstrates better performance under nonlinear load conditions.

Since the dq method uses the PCC voltages directly in the control process, reference signals are produced faster. In this way, faster responses are provided to dynamic load changes. In the SOGI-CSD method, the delays that occur during the filtering of the PCC voltages and the simple structure of the method have reduced its performance compared to the dq method. When the SEIG current, voltage and their THD ratios are examined, it highlighted the performance of the dq method, especially under nonlinear load conditions.

4.2. Performance of DSTATCOM-based SEIG under Unbalanced Loads

Fig. 11 and 12 illustrate the performance of the proposed control algorithms for the SEIG system under unbalanced load conditions. Fig. 11 shows the results obtained using the dq method, while Fig. 12 presents the results for the SOGI-based CSD method. In this test, unbalanced loads consisting of 12Ω , 10Ω , and 8Ω resistances are connected across the phases, creating an imbalance in the system. These unbalanced loads draw currents of varying magnitudes from the phases, leading to system instability. DSTATCOM compensates for these imbalances and provides stability in the SEIG currents and voltages.

As shown in Fig. 11a and 12a, due to unbalanced loads, the load currents exhibit significant imbalances. As depicted in Fig. 11b and 12b, the DSTATCOM effectively mitigates these phase imbalances by injecting compensatory currents. Consequently, as seen in Figures 11d and 12d, the imbalances in SEIG currents and voltages are eliminated thanks to the currents injected by DSTATCOM. When examining the terminal peak values (V_t), a slight oscillation is observed in the dq method (Fig. 11e). However, the SOGI-based CSD method filters the voltages prior to computation, resulting in significantly reduced oscillations, as demonstrated in Fig. 12e.

In both algorithms, as shown in Fig. 11f and 12f, the DC bus voltage exhibits an oscillation of approximately 2 V. Despite the observed oscillations, the DC bus voltage maintains stability throughout the tests.

In 3P3W systems that lack a neutral line, zero-sequence currents cannot be present due to the absence of a return path. Therefore, the control strategies mainly focus on compensating negative-sequence components in order to balance the system.



Figure 9. Performance of proposed dq method under nonlinear load (a) Load current and its THD, (b) SEIG current and its THD, and (c) SEIG terminal voltage and its THD.



Figure 10. Performance of proposed SOGIbased CSD method under nonlinear load (a) Load current and its THD, (b) SEIG current and its THD, and (c) SEIG terminal voltage and its THD.

As demonstrated in the simulation results, both the dq and SOGI-based CSD methods contribute to the mitigation of current and voltage imbalances under unbalanced load conditions. By injecting appropriate compensating currents, DSTATCOM ensures that the SEIG continues to operate with balanced and stable output voltages and currents.

The active and reactive power responses under unbalanced load conditions are shown in Figs. 13 and 14 for both dq and SOGI-based CSD methods, respectively. These figures demonstrate the capability of both control strategies to regulate power flow and mitigate the impact of load imbalance.



Figure 11. Performance of proposed dq method CSD method under unbalanced loads (a) Load currents, (b) DSTATCOM currents, (c) SEIG currents, (d) SEIG terminal voltages, (e) Amplitude of SEIG voltages, and (f) DC bus voltage.



Figure 12. Performance of proposed SOGI-based CSD method under unbalanced loads (a) Load currents, (b) DSTATCOM currents, (c) SEIG currents, (d) SEIG terminal voltages, (e) Amplitude of SEIG voltages, and (f) DC bus voltage.



Figure 13. Active-reactive power performance of the SEIG-DSTATCOM system under unbalanced load using dq method.



Figure 15. Performance of proposed dq method under unbalanced load (a) Load current and its THD, (b) SEIG current and its THD, and (c) SEIG terminal voltage and its THD.



Figure 14. Active -reactive power performance of the SEIG-DSTATCOM system under unbalanced load using SOGI-CSD method.



Figure 16. Performance of proposed SOGI-based CSD method under unbalanced load (a) Load current and its THD, (b) SEIG current and its THD, and (d) SEIG terminal voltage and its THD.

The THD analysis more clearly highlights the performance differences between the two methods. Figures 15 and 16 detail the THD results for the dq and SOGI-based CSD methods, respectively. In Figure 15a, the dq method presents a load current THD of 0.93%, while the SOGI-based method in Figure 16a presents a slightly higher THD of 1.36%. The THD of the SEIG currents is 2.97% with the dq method (Figure 15b) and 4.17% with the SOGI-based method (Figure 16b). Similarly, the THD of the SEIG voltages is lower for the dq method at 0.82% (Figure 15c) and 1.33% for the SOGI-based method (Figure 16c).

Overall, the results show that the dq method outperforms the SOGI-based CSD method under unbalanced load conditions.

4.3. Performance of DSTATCOM-based SEIG under in the DC-Offset

In this test, to evaluate the performance of the two control algorithms, DC offset components were added to the measured load currents at 7.1 seconds. At 7.2 seconds, DC offsets were added to the SEIG voltages in addition to the DC offsets in the currents. DC offsets applied to the SEIG voltages were 20 V, -20 V and 30 V, while DC offsets of 5 A, -2 A and 3 A were applied to the load currents, respectively.

Fig.17a and 18a illustrate the load currents with the applied DC offsets, and Fig.17b and 18b show that the DSTATCOM currents undergo waveform changes starting at 7.2 seconds due to the DC offsets.

In the dq method, despite the DC offset in the measured currents and voltages, the SEIG currents (Fig. 17c) and voltages (Fig. 17d) are correctly generated and remain balanced. In contrast, in the SOGI-CSD method, the SEIG currents show slight imbalances (Fig. 18c), but the SEIG voltages remain balanced (Fig. 18d).

The SEIG voltage amplitude (V_t), calculated using the dq method and presented in Fig. 17e, begins to oscillate at 7.2 seconds due to the influence of the DC offsets, as it is derived directly from the measured voltages (according to Eq. 5). Conversely, the SOGI-CSD method, through its filtering mechanism, shows reduced oscillations in the SEIG voltage amplitude (Fig. 18e).

Examination of the DC bus voltages (V_{dc}) reveals that the dq method maintains values closer to the reference and exhibits more stable performance (Fig. 17f), whereas the DC offsets introduced to the SEIG voltages in the SOGI-CSD method result in more pronounced oscillations (Fig. 18f).

In DC offset conditions, offset components injected into the load current and voltage may negatively affect the system performance if not handled properly. The control strategies used in this study are designed to suppress the propagation of DC components to the source side. According to the results, both methods maintain system stability under DC offset, with the dq method achieving slightly better performance in maintaining the DC bus voltage and minimizing oscillations. This shows that the control algorithms are effective in preserving system reliability under abnormal load conditions.

Figures 19 and 20 illustrate the power performance of the dq and SOGI-based CSD methods, respectively, under DC offset conditions. Both methods manage to stabilize active and reactive power despite the presence of offset components in the load.

According to the Total Harmonic Distortion (THD) values presented in Fig. 21 and 22, the dq method yields a THD of 3.41% for the SEIG currents, compared to 4.69% for the SOGI-CSD method. For the SEIG voltages, both methods present similar THD values of approximately 2.65%. In conclusion, although neither method is completely immune to the effects of DC offsets, the dq method overall produces smoother current waveforms and lower harmonic distortion, thereby demonstrating better performance. Moreover, the THD values for both SEIG currents and voltages remain below the 5% threshold specified by the IEEE-519-2014 standard.



Figure 17. Performance of proposed dq method under DC offset (a) Load currents, (b) DSTATCOM currents, (c) SEIG currents, (d) SEIG terminal voltages, (e) Amplitude of SEIG voltages, and (f) DC bus voltage.



Figure 18. Performance of proposed SOGI-based CSD method under DC offset (a) Load currents, (b) DSTATCOM currents, (c) SEIG currents, (d) SEIG terminal voltages, (e) Amplitude of SEIG voltages, and (f) DC bus voltage.



Figure 19. Active-reactive power performance of the SEIG-DSTATCOM system under DC offset condition using dq method.



Figure 21. Performance of proposed dq method under DC offset condition (a) Load current and its THD, (b) SEIG current and its THD, and (c) SEIG terminal voltage and its THD.



Figure 20. Active -reactive power performance of the SEIG-DSTATCOM system under DC offset condition using SOGI-CSD method.



Figure 22. Performance of proposed SOGI-based CSD method under DC offset condition (a) Load current and its THD, (b) SEIG current and its THD, and (c) SEIG terminal voltage and its THD

Table 2 presents a comparative summary of the total harmonic distortion (THD) values for both dq and SOGI-based CSD methods under different operating conditions. It is observed that the dq method generally achieves lower THD levels in SEIG currents and voltages across all test cases. Especially under unbalanced load and DC offset conditions, the dq method demonstrates superior harmonic suppression performance. Although the SOGI-CSD method also keeps THD values within acceptable limits, the results confirm that the dq method provides more consistent power quality improvement.

Table 2. Comparison of THDs for DSTATCOM Control Theories							
	SRF-PLL based dq-theory				SOGI-CSD theory		
Toot Conditions	Load	SEIG	SEIG	Load	SEIG	SEIG	
Test Conditions	current	current	voltage	current	current	voltage	
Nonlinear load	8.92%	3.27%	1.33%	9.15%	3.99%	1.57%	
Unbalanced	0.02%	2.07%	0.020/	1 26 0/	1 1 7 0/	1.33%	
load	0.95 /0	2.97 /0	0.82 /0	1.30 //	4.17 /0		
dc-offset	2.58%	3.41%	2.65%	2.41%	4.69%	2.64%	

5. Conclusions

The performances of the dq method and csd method are compared under nonlinear loads, unbalanced loads and DC offset condition. dq method provides superior performance by providing direct control of active and reactive power in the SEIG system. Under nonlinear load conditions, it effectively reduces the effect of harmonics and ensures the generation of balanced and smooth current and voltage waveforms. In unbalanced load scenarios, it successfully compensates for phase imbalances in both current and voltage, maintaining system stability. Moreover, under DC offset conditions, the dq method not only ensures the accuracy of both current and voltage generation, but also maintains stable system performance by keeping the DC bus voltage close to the reference value. Under these conditions, the SOGI-CSD method also produces comparable results, especially excellent in estimating phase voltages and PCC peak voltage. It stands out with its simple structure as it does not include transformations in the control scheme. However, when the THD levels of current and voltage are compared, the dq method shows superior performance. In addition, the THD values for both current and voltage in each method remain within the acceptable limits specified by the relevant IEEE-519 standard. As a result, although both algorithms operate within acceptable performance limits, the dq method stands out due to its superior control mechanism and harmonic suppression capabilities.

Acknowledgment

This work supported in part by the Scientific Research Projects Coordinating Office of Selçuk University (No. 20111012).

Conflict of Interests

The authors of the article declare that they have no personal or financial conflict of interest with any institution, organization or person.

References

- Sibrahim M, Aissou S, Rouas R, Haddad S, Benamourche N. Experimental determination of minimum capacitor for self-excitation of induction generators. International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS) 2024; 15: 109–116.
- [2] Singh G, Singh V. SEIG-based transient and steady-state analysis using dragon fly approach. Soft Computing 2022; 1–13.

- [3] Giri AK, Arya SR, Maurya R, Chittibabu B. Control of VSC for enhancement of power quality in offgrid distributed power generation. IET Renewable Power Generation 2020; 14: 771–778.
- [4] Dwari B, Arya SR, Chilipi R. Enhancing power quality with optimized PI controller in three-phase four-wire wind energy system. Electrical Engineering 2024; 1–19.
- [5] Chilipi R, Sumnait AA, Singh B. Control of self-excited induction generator-based micro-hydro power generation system feeding single-phase and three-phase loads. In: 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. IEEE; 2020; 1–8.
- [6] Singh B, Murthy S, Reddy R, Arora P. Implementation of modified current synchronous detection method for voltage control of self-excited induction generator. IET Power Electronics 2015; 8: 1146– 1155.
- [7] Lolamo M, Kumar R, Sharma V. Enhancing power quality of PV-DSTATCOM integrated grid with modified adaptive LMS control. Electrical Engineering 2024; 1–14.
- [8] Özer AS, Sevilmis F, Karaca H, Arabaci H. Enhanced control method for voltage regulation of DSTATCOM based SEIG. Energy Reports 2022; 8: 839–847.
- [9] Özer, AS., Karaca, H., & Sevilmiş, F. APF Based Control Algorithm for Voltage Regulation of Self Excited Induction Generator Using DSTATCOM. International Conferences on Science and Technology (ICONST) 2023; 327-332
- [10] Katole DN, Daigavane MB, Gawande SP, Daigavane PM. Modified single phase SRF dq theory based controller for DVR mitigating voltage sag in case of nonlinear load. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications 2017; 9: 22–33.
- [11] Sevilmis F, Karaca H. Performance analysis of SRF-PLL and DDSRF-PLL algorithms for grid interactive inverters. International Advanced Researches and Engineering Journal 2019; 3: 116–122.



Adıyaman University Journal of Engineering Sciences Adyü J Eng Sci 2025;12(25):132-142 Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Adyü Müh Bil Derg 2025;12(25):132-142 https://doi.org/10.54365/adyumbd.1628501

Research Article / Araştırma Makalesi

Sivas-Erzurum Alanındaki Kabuğun Tektonik Yapısının ve İzostatik Denge Durumunun Gravite Verileriyle Araştırılması

Investigation of Tectonic Structure and Isostatic Balance Status of the Crust in Sivas-Erzurum Area with Gravity Data

Ali Elmas 1*

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, Sivas-Erzurum alanındaki kabuğun tektonik yapısı ve izostatik denge durumu gravite verileri kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada, kütle sınırlarını belirlemek için toplam yatay türev tekniği kullanılmıştır. Bouguer gravite verilerinden süzgeçleme ile elde edilmiş rejyonal gravite değerlerinin birinci düşey türev değerlerine bu teknik uygulanmıştır. Böylece, yoğunluk farkı sunan kütle sınırları genel hatlarıyla ortaya koyulmuştur. Gravimetrik moho ve izostatik moho değerleri hesaplanarak, alanın izostatik denge durumu araştırılmıştır. Böylece, sismik olarak aktif ve pasif alanlar haritalanmıştır. Çalışma alanı, Afrika levhasının kuzeye doğru hareketiyle sıkışan ve buna bağlı olarak da tektonik olarak oldukça aktif bir alandır. Buna bağlı olarak bu çalışmanın sonuçları, çalışma alanındaki bakir maden yataklarının yerlerinin tespit edilebilmesinde fayda sağlayabilir. Ayrıca, alanda deprem riski taşıyan yerlerin genel görünümü bu çalışma ile verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tektonik, Toplam Yatay Türev, Birinci Düşey Türev, Yapısal Süreksizlik, İzostatik Durum

Abstract

In this study, the tectonic structure and isostatic balance status of the crust in the Sivas-Erzurum area were investigated. Gravity data were used for this purpose. In the study, the total horizontal derivative technique was used to determine the mass boundaries. First, regional gravity values were obtained from Bouguer gravity data by filtering. Then, the first vertical derivative values of these values were calculated. The total horizontal derivative technique was applied to these derivative values. Thus, the mass boundaries presenting density differences were generally revealed. The isostatic balance status of the area was investigated by calculating the gravimetric moho and isostatic moho values. Thus, seismically active and passive areas were mapped. The study area is a tectonically very active area that is compressed by the northward movement of the African continent. Accordingly, the results of this study may be useful in determining the locations of virgin mineral deposits in the study area. In addition, the general view of the earthquake risk areas in the area is given in this study.

Keywords: Tectonics, Total Horizontal Derivative, First Vertical Derivative, Structural Discontinuity, Isostatic Condition

^{*} Sorumlu yazar e-posta (Corresponding e-mail): <u>elmas@ktu.edu.tr</u> Geliş Tarihi (Received):28.01.2025, Kabul Tarihi (Accepted): 11.04.2025

1. Giriş

Alpin sıradağlar kuşağında bulunan Türkiye; Anadolu, Avrasya, Arabistan ve Afrika levhalarını içine alan, tektonik olarak aktif bir alanda bulunmaktadır [24, 25, 40, 44]. Tektonik bakımdan Türkiye'deki sıradağlar, bir çalışma ile sınıflandırılmıştır [4]. Bu sınıflandırmada yer alan sıradağlar güneyden kuzeye doğru sırasıyla Kenar Kıvrımlar, İranidler, Toridler, Anatolidler ve Pontidlerdir. İçilid, Ortailid ve Ege İranidi sıradağlarını da bu sınıflandırmaya, daha sonraki bir zamandaki bir çalışmada eklenmiştir [13]. Daha sonraki jeolojik çalışmalarda neotektonik safhayı oluşturan beş farklı yapı belirlenmiştir [1, 43, 46]. Bu yapılar, Ölü Deniz Fayı, Bitlis-Zağros Bindirme Zonu, Doğu Anadolu Fay Zonu, Kuzey Anadolu Fay Zonu ve Ege-Kıbrıs yayından oluşmaktadır. Belirlenen bu yapılarla ilişkili olarak da üç farklı neotektonik alan sınıflandırması yapılmıştır. Sınıflandırılmış bu alanlar ise, Orta Anadolu Ovalar alanı, Ege graben sistemi alanı ve Doğu Anadolu sıkışma alanlarından oluşmaktadır. Yapılan bir çalışmaya göre, Türkiye coğrafyasında devam eden depremlerin ve tektonik olayların başlangıç zamanı Pliyosen zamanıdır [20]. Daha sonraki bir zamanda yapılan bir jeolojik çalışmaya göre, Türkiye; Güneydoğu Anadolu, Anatolid-Torid Bloku ve Pontidler olarak sınıflandırılmıştır. İzmir - Ankara - Erzincan zonu ile diğer tektonik birimlerden ayrılan Pontidler, Türkiye'nin kuzeyine doğru konumlanmıştır. Rodop-Pontid ve Sakarya kısımları olarak ayrılan Pontidler [43], daha sonraki bir zamanda yapılan bir çalışmaya göre de İstranca masifi, Sakarya ve İstanbul zonları olarak da isimlendirilmiştir [27]. Jeolojik ve tektonik olaylara bağlı olarak zaman içerisinde gelişen Türkiye tektonik yapısının son durumu Şekil 1'de verilmiştir. Doğu Anadolu Fayı (DAF), Kuzeydoğu Anadolu Fayı (KDAF) ve Kuzey Anadolu Fayı (KAF) çalışma alanında öne çıkan faylardır [9, 10, 20, 27, 28]. Çalışma alanındaki diğer önemli faylar ise; Bitlis-Zağros Sütur Zonu (BZSZ), Ecemiş Fayı (EF) ve Karadeniz Fayı (KF)'dır [11]. Afrika levhasının kuzeve doğru hareketiyle, Türkiye coğrafyasında oluşan sıkışma ve açılma alanları Şekil 1'de görülmektedir [11].

Bu çalışmada, Afrika levhasının kuzeye doğru hareketiyle sıkışan Türkiye coğrafyasında, Sivas-Erzurum civarlarındaki alanın sahip olduğu son tektonik yapı ve yine bu alandaki kabuğun izostatik denge durumları araştırılmıştır. Tektonik yapıya bağlı olarak, kütle sınırları belirlenmeye çalışılmıştır. Hem kütle sınırlarının belirlenmeye çalışılmıştır. Kütle sınırlarını belirlenmeye çalışılmıştır. Kütle sınırlarını belirleyebilmek için çalışma alanına ait Bouguer gravite verilerinden elde edilmiş rejyonal gravite anomali değerleri kullanılmıştır. Bu anomali değerlerine öncelikle düşey türev hesaplaması yapılmıştır. Hesaplanan türev değerlerinin toplam yatay türev değerleri bulunmuştur. Ayrıca, izostatik denge durumunu araştırabilmek için ters çözümle gravimetrik moho ve Airy modeline göre de izostatik moho arayüzeyleri hesaplanmıştır. Böylece, bu iki arayüzey arasındaki farklar kullanılarak, çalışma alanındaki sismik olarak aktif ve pasif alanlar belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metod



Türkiye'nin başlıca tektonik yapı unsurları Şekil 1'de verilmiştir.

Şekil 1. Türkiye'nin başlıca tektonik yapı unsurları; Bitlis-Zağros Sütur Zonu (BZSZ), Doğu Anadolu Fayı (DAF), Ecemiş Fayı (EF), Kuzey Anadolu Fayı (KAF), Kuzeydoğu Anadolu Fayı (KDAF) ve Karadeniz Fayı (KF) ([11]'den alınmıştır).

Çalışma alanındaki aktif faylar Şekil 2a'da görülmektedir. Şekil 2b'de de, çalışma alanında 1900 yılından günümüze kadar meydana gelen ve büyüklüğü 4'ten büyük depremlerin episantr ve hiposantr dağılımları verilmiştir (Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü). Bu haritalarda, mevcut aktif faylarla oluşmuş depremlerin konumları arasında önemli bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak, bu alanın sismik açıdan ve tektonik açıdan çok önemli bir alan olduğu göze çarpmaktadır.



Şekil 2. a) Çalışma alanının aktif faylarının dağılımı ([18]'den alınmıştır) ve b) çalışma alanında 1900 yılından günümüze kadar meydana gelen ve büyüklüğü 4'ten büyük depremlerin episantr ve hiposantr dağılımları haritası (Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü) (Ziyaret tarihi: 06.01.2025).

Çalışma alanının tektonik yapısı, zaman içerisinde farklı verilerden yararlanılarak araştırılmıştır [4, 13, 20, 24, 27, 28, 43, 44]. Gravite ve manyetik veri setlerinden hareketle, çalışma alanı ve civarının kabuk yapısı araştırılmıştır [5]. Bu çalışmada, çalışma alanının sahip olduğu son tektonik yapı ve yine bu alandaki kabuğun izostatik denge durumları araştırılmıştır. Hem kütle sınırlarının belirlenmesine bağlı olarak ve hem de izostatik denge durumlarına bağlı olarak sismik açıdan aktif ve pasif alanlar belirlenmeye çalışılmıştır. Kütle sınırlarını belirleyebilmek için çalışma alanına ait Bouguer gravite verilerinden elde edilmiş rejyonal gravite anomali değerleri kullanılmıştır. Bu anomali değerlerine öncelikle düşey türev hesaplaması yapılmıştır. Hesaplanan türev değerlerinin toplam yatay türev değerleri bulunmuştur. Bu işlemler için POTENSOFT programından yararlanılmıştır [3]. Airy izostazi modeline göre hesaplanan izostatik durumu irdelenmiştir. Böylece, bu iki arayüzey arasındaki farklar kullanılarak, şalışma alanının izostatik durumu irdelenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan topografya verileri (Şekil 3a) 1 km aralıklı çözünürlüğe sahip Küresel Yükseklik Modeli (GTOPO30) verilerinden alınmıştır [45]. Diğer taraftan, bu çalışmada kullanılan gravite verileri de Dünya Gravite Modeli verilerinden alınmıştır [36]. Şekil 3a ve 3b'ye bakıldığında, tektonik yapılara bağlı olarak, topoğrafya ve gravite anomalilerinin değişik doğrultularda uzanımlar gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3. a) Çalışma alanının topografya haritası ve b) Bouguer gravite anomali haritası.

Çalışma alanındaki kabuğun içindeki tabaka derinlikleri, [42]'nin geliştirdiği genlik spektrumundan yararlanılarak, iyi bir hassasiyetle hesaplamıştır. Genlik spektrumu tekniği ile daha önceki çalışmalarda, iyi bir hassasiyetle tabaka derinlik hesapları yapılmıştır [16, 26, 31]. Genlik spektrumu tekniği, gravite değerlerinin 2B Fourier dönüşümleriyle yapılır. Diğer taraftan, kabuk içindeki mevcut tabakaların ortalama derinlik değerleri, hesaplanan dalga sayıları ile gravite değerlerinin genlik spektrum değerleri arasında belirlenen doğrusal ilişkilerin eğimlerinden hesaplanır. Bu çalışmada, genlik spektrumu hesaplamaları sonucunda, tabakalara ait dört ayrı ortalama derinlik değeri hesaplanmıştır (Şekil 4). Bu derinlik değerleri hesaplamalarında Litosfer-Astenosfer Sınırı (LAS) için 90.4 km, Moho sınırı için 41.5 km, Conrad sınırı için 19.3 ve temel kaya sınırı için de 7.1 km ortalama derinlik değerleri hesaplanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Çalışma alanının gravite verileri kullanılarak hesaplanan genlik spektrumu.

2.1. TYT Sınır Analizi

Literatüre geçmiş çalışmalarda, yoğunluk farkı veren kütle sınırlarının tespiti için yapılan TYT hesaplamalarında genellikle gravite verileri kullanılmıştır [2, 14, 23, 37-39]. Bununla birlikte, gravite verilerinden ziyade, bu verilerden hesaplanan birinci düşey türev değerlerinin, kabuk çalışmalarında daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [21]. Probleme uygun süzgeçleme yapılarak hesaplanan rejyonal gravite değerlerinin düşey türevi alınarak belirlenen verileri değerlendirmek için ve kabuk içindeki yoğunluk farkı veren kütle sınırlarını tespit etmek için, sınır analizi teknikleri geliştirilmiştir ve bu teknikler bulunan türev verileriyle kullanılmıştır [32, 33]. Bu çalışmada bu teknik, çalışma alanı için süzgeçleme ile hesaplanmış rejyonal gravite değerlerinin türev değerleriyle kullanılarak, yoğunluk farkı veren kütle sınırları belirlenmiştir. Bu amaçla, ilk olarak çalışma alanının Bouguer gravite değerlerine alçak geçişli süzgeçleme yapılmıştır. Böylece, rejyonal gravite değerleri belirlenmiştir. Belirlenen bu verilere birinci düşey türev hesaplaması yapılmıştır. Bu türev işlemi için de, Hızlı Fourier dönüşüm (FFT) tekniğinden yararlanılmıştır [22]. TYT değerlerinin genlik değeri, türev değerleri kullanılarak Formül 1'de olduğu gibi yazılır:

$$T(x,y) = \sqrt{\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x \, \partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 g}{\partial y \, \partial z}\right)^2} \tag{1}$$

Burada $\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial z}$ ve $\frac{\partial^2 g}{\partial y \partial z}$ kısımları gravite verilerinden hesaplanmış olan birinci türevlerin x ve y yönlerinde gösterdikleri değişimler olarak ifade edilmiştir.

2.2. Ters Çözüm Tekniği

Parker-Oldenburg işlemi kabuk içindeki arayüzleri göstermek için başarıyla kullanılmıştır [15, 31, 41]. Bir arayüzeyin topografyasının derinlik değerlerini Parker-Oldenburg yöntemiyle hesaplamak için önce bir başlangıç derinlik değeri kullanılır. Bu başlangıç değeri, genlik spektrumundan belirlenir. Parker-Oldenburg tarafından geliştirilen yöntem, ölçüm ağındaki derinlik ve gravite değerlerinin Fourier dönüşümlerine bağlıdır [29, 35]. Homojen ve düzensiz olan bir tabakaya ait gravite verilerini belirlemek için yararlanılan Fourier dönüşüm formülü aşağıda verildiği gibidir:

$$f[z_1(x)] = -\frac{f[\Delta g(x)]e^{|k|z_0}}{2\pi G\rho} - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{|k|^{n-1}}{n!} f[z_1^n(x)],$$
⁽²⁾

Burada $f[\Delta g(x)], z_0, z_1(x), k, G$, ve ρ sırasıyla Fourier dönüşümü, ortalama derinlik, derinlik, dalga sayısı, gravitasyonal sabit ve yoğunluk parametrelerini temsil etmektedirler. Arayüzey topografya yoğunluk değerini belirlemek için z_0 ve $\Delta g(x)$ verileri yinelemeli olarak Formül 2'de kullanılır. Bu arayüzeyin derinlik değerinin ilk tahmini, ters Fourier dönüşümü kullanılarak elde edilir. Ayrıca, bu değer Formül 2'nin sağ tarafındaki ifadeyi hesaplamak için kullanılır. Bu şekilde, ikinci derinlik değeri de hesaplanır. Yakınsama kriteri dikkate alınarak yinelemelere son verilir. Böylece, çalışma alanının Moho topografyası ters çözümle hesaplanmıştır. Bu işlem için, Bouguer gravite verilerinden hesaplanan, süzgeçlenmiş gravite verileri kullanılmıştır. Yani, Moho topografyasını Parker-Oldenburg algoritması ile hesaplamak için, çalışma alanının Bouguer gravite verilerine bant geçişli süzgeç uygulayarak, Kc1 ve Kc2 dalga sayıları arasında olan, süzgeçlenmiş gravite verileri kullanılmıştır. Daha sonra, süzgeçlenmiş bu gravite verileri ters çözümle kullanılarak, Moho topografyası hesaplanmıştır. Moho arayüzey topografyasını ters çözümle modellemek için yinelemeler yakınsama ölçüsüne ulaşılana kadar devam etmiştir. Diğer bir ifadeyle, ardışık iki yineleme sonunda tahmin edilen derinlikler (z_i) arasındaki ortalama karekök (RMS) hataların yakınsama kriterinden (0,01 km) daha küçük olmasına dikkat edilir. Moho arayüzey topografyasını hesaplamak için litosferik manto (~3,28 g/cm3) ile ortalama kabuk (~2,72 g/cm3) arasında oluşan yoğunluk farkı 0,56 g/cm3 olarak hesaplanmıştır [30]. Şekil 6a'ya bakıldığında, özellikle Erzurum civarlarında Moho topografya derinliklerinde bir artış olduğu görülmektedir. Moho topografya haritasına bakıldığında Moho derinliklerinin 29 - 51 km arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 6a).

2.3. İzostatik denge araştırması

Moho arayüzünde aşırı kök oluşumu alanları izostatik denge analiz yöntemleri kullanılarak başarıyla belirlenebilir [7, 8, 12, 17, 34]. İzostatik dengenin derecesi, Gravimetrik Moho ve Izostatik Moho arasındaki farkların yüzdelerine göre hesaplanır [7]. İzostatik denge oranları, bir bölgenin sismik aktivitesini anlamada önemli bilgiler sağlar. Bu durum, yerkabuğunun kararsızlığı ile sismik aktivitedeki artış arasındaki ilişkidir [12]. Eğer kabuk düşey yüklere karşı olması gerektiği gibi kökler geliştirmişse, bu köklere gerçek kökler (Izostatik Moho) denir. Gözlenen Bouguer gravite anomalisinden hesaplanan köklere de Gravimetrik Moho, İzostatik Moho'dan daha derinde ise, kabuğun bu kısmı, düşey yüklere karşı dengesizdir [8]. Dengeli alanlarda düşey yüklere karşı yeterli kök oluşmuştur. Airy Izostazi modeline göre herhangi bir ölçüm noktasındaki topografya derinlik değeri 6.209 katsayısı ile çarpılarak o noktanın altındaki kök yükseklik değeri bulunabilir [34]. Bu noktanın altına inen İzostatik Moho derinliğini (h_i) bulmak için de, yaklaşık 30 km olarak kabul edilen denge derinliği T_d 'ye yükselim değerleri (r_i) eklenir (Denklem 3) [34].

$$h_i = T_d + r_i = 30 + r_i \tag{3}$$

Şekil 6a, Kc1 ve Kc2 dalga sayılarında süzgeçlenmiş gravite verilerinin ters çözümü ile elde edilmiş Gravimetrik Moho topografyasını göstermektedir. Öte yandan, Şekil 6b Formül 3 ile topografya değerleri kullanılarak hesaplanan İzostatik Moho topografyasını göstermektedir. Her bir ölçüm noktasında Gravimetrik Moho derinlik değerinden İzostatik Moho derinlik değerleri çıkarılarak elde edilen fark haritası Şekil 6c'de görülmektedir. Böylece, bölgedeki Gravimetrik ve İzostatik Moho derinlikleri hesaplanarak, izostatik olarak dengeli ve dengesiz alanlar belirlenmiştir. Şekil 6c'ye bakıldığında, aşırı dengelenmiş alanların altında gereğinden fazla köklerin oluştuğu söylenebilir. Dengesiz alanlarda düşey yüklere karşı yeterli kök oluşmadığı ve sismik faaliyetlerin devam edeceği söylenebilir.

3. Yapılan Çalışmalar

Çalışma alanı için yapılan hesaplamalar sonucunda belirlenen rejyonal gravite anomali haritası Şekil 5a'da, düşey türev anomali haritası Şekil 5b'de ve TYT anomali haritası da Şekil 5c'de verilmiştir. Burada yapılan hesaplamaların ilkinde, rejyonal gravite değerlerini Bouguer gravite değerlerinden elde etmek için yapılan alçak geçişli süzgeçleme işleminde kesme dalga sayısı olarak Kc4 dalga sayısı değeri
kullanılmıştır. Bulunan rejyonal gravite değerlerinin birinci düşey türevi hesaplandığında, temel kaya yüzeyine yakın olan ve yoğunlukları civar kayaçlara göre nispeten biraz yüksek olan birimlerin dağılımı Şekil 5b'de net olarak görülmektedir. Burada göze çarpan olaylar, Sivas'ın güney kesimlerinde KAF boyunca bu birimlerin sıralandığı ve yine bazı aktif fayların doğrultularıyla uyumlu olarak uzandıkları görülmektedir.



Şekil 5. a) rejyonal gravite anomali haritası, b) düşey türev anomali haritası ve c) TYT anomali haritası.

TYT haritasına bakıldığında, çalışma alanındaki kabuğun içinde, yoğunluk farkı veren kütlelerin sınırları yüksek genlikli olarak takip edilebilir. Ayrıca, bu süreksizlikler mevcut faylarla da bazı kısımlarda uyumludur. (Şekil 5c). Özellikle, Şekil 5c'deki yatay türev haritasında ise, Sivas'ın güneyindeki fayların, KAF, EF ve KDAF'ların uzanımlarının, yüksek genlikli TYT anomalilerinin uzanımlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, aktif fayların haricinde, diğer alanlardaki yüksek genlikli TYT anomali uzanımları da görülmektedir. Altın minerali ve gümüş minerali gibi çok değerli olan maden yataklarının oluşumlarında tektonik süreksizliklerin önemi çok fazladır [19]. Bu itibarla, bölgede halen keşfedilmeyi bekleyen maden yataklarının yerini belirleme çalışmalarında, hesaplanan bu TYT haritasının önemi çok büyüktür.

Ters çözümle bulunan Moho derinlik değerlerinin, 29 - 51 km arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 6a). Burada, Moho arayüzeyinin alçak kesimlerinde 30 km civarında değerler alırken, yüksek kesimlerde ve özellikle doğuya doğru 50 km değerlerine kadar derinleştiği görülmektedir. Şekil 6b'de ise topografya değerlerine bağlı olarak hesaplanan izostatik moho arayüzeyi görülmektedir. Bu arayüzey derinlik değerleri de, yaklaşık olarak gravimetrim moho arayüzeyi derinlik değerleri gibi davranmaktadır. Yani, sahil kesimlerinde sığ iken, iç kesimlere doğru ve dağlık alanlara doğru derinleşmektedir. Bunlara bağlı olarak, çalışma alanındaki gravimetrik moho - izostatik moho farkları ile düşük ve yüksek sismik aktiviteve sahip kısımlar ortaya çıkarılmıştır (Şekil 6c). İzostatik olarak aşırı dengelenmiş alanların altında, yani izostatik moho arayüzeyinin gravimetrik moho arayüzeyinden daha derinde olduğu kısımlarda gereğinden fazla kök oluşur ve bu alanlarda genellikle sismik aktiviteler görülmez. Diğer taraftan, izostatik moho arayüzeyi gravimetrik moho arayüzeyinden daha yukarıda olduğu kısımlarda genellikle sismik aktiviteler görülür. Şekil 6c izlenerek, sismik açıdan aktif ve pasif olabilecek alanlar görülebilir. Özellikle KAF boyunca uzanan kısımlar, Erzurum civarları, EF 'nın da yeraldığı Sivas civarları ve güneyi, DAF'ın kuzey kısımları, BZSZ'nin güney kısımları ve Karadeniz sahil kısımları sismik olarak aktif alanlardadır (Şekil 6c). Bir de, Trabzon ve civarının dengeli alanda olduğu ve bu alanın hemen güneyindeki KAF'na doğru olan kısımların dengesiz alanlar, yani sismik olarak aktif alanlar olduğu da görülmektedir. Bu çalışmanın sonuçları, çalışma alanındaki bakir maden yataklarının ve deprem riski taşıyan bazı yerlerin ortaya çıkarılmasına katkı sağlayabilir.



Şekil 6. a) Ters çözümle elde edilen Gravimetrik Moho topografyası, b) Topografya değerleri kullanılarak Airy modeline göre hesaplanan İzostatik Moho topografyası ve c) Gravimetrik Moho ve İzostatik Moho derinlikleri arasındaki farklar.

4. Sonuçlar

Calışma alanına ait Bouguer gravite verileri için genlik spektrumu hesaplaması sonucunda temel kaya, Conrad, Moho ve LAS arayüzeylerinin ortalama derinlik değerleri sırasıyla 7.1 km, 19.3 km, 41.5 km ve 90.4 km olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada, belirli bir kesme dalga sayısına (Kc4) göre süzgeçleme işlemi yapıldıktan sonra hesaplanmış olan rejyonal gravite değerlerinin türevine TYT işlemi yapılmıştır. Bu işlem sonucunda, kabuk içinde belli bir derinlikte var olan kütlelerin yoğunluk farkı veren sınırlarının uzanımları ve değerlerin bölgesel dağılımı ortaya koyulmuştur. Bölge, maden yataklarıyla, tektonik yapısıyla ve büyük faylarıyla önemli bir sahadadır. Diğer taraftan, bu alan ve civarı uzun zamandan beri çok sayıda deprem olayıyla karşı karşıya kalmıştır. Ters çözümle bulunan Moho derinlik değerleri, sahillerden iç kesimlere doğru ve de doğuya doğru da artmaktadır. Moho derinliklerinin 29 - 51 km arasında değiştiği görülmektedir. Çalışma alanındaki Gravimetrik Moho - İzostatik Moho farkları ile düşük ve yüksek sismik aktiviteye sahip kısımlar ortaya çıkarılmıştır. İzostatik olarak aşırı dengelenmiş alanların altında gereğinden fazla kök oluştuğu belirlenmiştir. TYT haritasında, özellikle KAF'ın varlığı ve EF'nın varlığı yüksek genlikli TYT değerleriyle izlenebilmiştir. Ayrıca diğer alanlarda da, yoğunluk farkı sunan yerler belirlenmiştir (Şekil 7a). Öte taraftan, dengeli alanlar ile dengesiz alanların deprem dağılımlarıyla olan ilişkileri Şekil 7b'de görülmektedir. Burada, sismik olarak aktif alanlarla deprem dağılımları arasında büyük bir uyum vardır. Uyumsuzluğun sadece KAF'ın batı kısımlarında ve DAF ve BZSZ arasındaki alanın batı kısımlarında var olduğu görülmektedir.



Şekil 7. a) Yüksek genlikli TYT anomali dağılımı ve b) dengeli ve dengesiz alanlar ile deprem dağılımları arasındaki ilişki.

Çalışma alanı Afrika levhasının kuzeye doğru hareketiyle sıkışan ve buna bağlı olarak da tektonik olarak oldukça aktif bir alandır. Buna bağlı olarak bu çalışmanın sonuçları, maden yataklarının genellikle kırık, çatlak ve fay sistemlerinde oluştuğundan, çalışma alanındaki bakir maden yataklarının yerlerinin tespit edilebilmesinde faydalı olabilir. Ayrıca, alanda yoğunluk farkı sunan çizgiselliklere sahip, izostatik olarak dengesiz olan ve deprem riski taşıyan yerlerin genel görünümü bu çalışma ile verilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Akbulut NE, Bayarı S, Akbulut A, Özyurt NN, Sahin Y. Rivers of Türkiye, Second Edition. Rivers of Europe, 2022; 7: 851–880.
- [2] Altınoğlu FF, Sarı M, Aydın A. Detection of Lineaments in Denizli Basin of Western Anatolia Region Using Bouguer Gravity Data. Pure and Applied Geophysics, 2015;172: 415–425.
- [3] Arısoy MÖ, Dikmen Ü. Potensoft: MATLAB-based Software for potential field data processing, modelling and mapping. Computer & Geosciences, 2011;37: 935–942.
- [4] Arni P. Doğu Anadolu ve mücavir mıntıkalarının tektonik ana hatları. MTA Tayini, 1939: seri B, No. 4, Ankara.
- [5] Ateş A, Bilim F, Büyüksaraç A, Aydemir A, Bektaş Ö, Aslan Y. Crustal structure of Turkey from aeromagnetic, gravity and deep seismic reflection data. Surveys of Geophys, 2012; 33: 869–885.
- [6] Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü (http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/. Ziyaret 06 Nisan 2024)
- [7] Bott MHP. Evolution of Young Continental Margins and Formation of Shelf Basins. Tectonophysics, 1971; 11: 319-327.
- [8] Braitenberg C, Zadro M, Fang J, Wang Y, Hsu HT. The Gravity and Isostatic Moho Undulations in Qinghai-Tibet Plateau. Journal of Geodynamics, 2000; 30(5): 489–505.
- [9] Celal Şengör AM, Yazıcı M. The aetiology of the neotectonic evolution of Türkiye. Mediterranean Geoscience Reviews, 2020; 2(3): 327–339.
- [10] Chadha RK. An Mw 7.8 Earthquake on 6 February 2023 on the East Anatolian Fault, Türkiye. Journal of the Geological Society of India, 2023; 99(4): 449–453.
- [11] Chang Y, Zhang Y, Zhang H. Tectonic geomorphology of Türkiye and its insights into the neotectonic deformation of the Anatolian Plate. Earthquake Research Advances, 2024; 4: 100267
- [12] Deng Y, Fan W, Zhang Z, Liang K.. The Gravity and İsostatic Moho in North China Craton and Their Implications to Seismicity. Earth Science, 2014; 27(2): 197-207.
- [13] Egeran N. Tectonique de la Turquie et Relations Entre les Unites Tectoniques et Les Gites Metalliferes de la Turquit. Imprimerie Georges Thomas, Nancy, 1947.
- [14] Elmas A, Karslı H, Kadirov FA. Lineaments in the Shamakhy–Gobustan and Absheron hydrocarbon containing areas using gravity data. Acta Geophysica, 2018; 66: 39-49.
- [15] Elmas A. Edge position detection and depth estimation from gravity data with application to mineral exploration. Carbonates and Evaporites, 2019; 34: 189-196.
- [16] Elmas A, Karslı H. Tectonic and crustal structure of Archangelsky ridge using Bouguer gravity data. Marine Geophysical Research, 2021; 42: 21 (DOI: 10.1007/s11001-021-09443-z)
- [17] Elmas A. Integrating gravity data to enhance understanding of northern Türkiye's geodynamic evolution. Acta Geophysica, 2025; https://doi.org/10.1007/s11600-024-01504-2
- [18] Emre Ö, Duman TY, Özalp S, Elmacı H, Olgun Ş, Şaroğlu F. Annotated 1/1.250.000 Scale Active Fault Map of Turkey, General Directorate of Mineral Research and Exploration. Special Publication Series-30, Ankara-Türkiye. 2013.
- [19] Ercan ÖA, Şeren A, Elmas A. Gold and silver prospection using Magnetic, Radiometry and Microgravity Methods in the Kışladağ province of Western Turkey. Resource Geology, 2014; DOI: 10.1111/rge.12024.
- [20] Erol O. Türkiye Jeomorfolojisi, Türkiye'nin Jeomorfolojik Evrimi ve Bugünkü Genel Jeomorfolojik Görünümü. Yayınlanmamış Ders Notu, İstanbul. 1989.
- [21] Evjen HM. The place of the vertical gradient in gravitational interpretations. Geophysics, 1936; 1: 127–136.
- [22] Gunn PJ. Linear transformations of gravity and magnetic fields. Geophysical Prospecting, 1975; 23(2): 300-312.
- [23] Hornby P, Boschetti F, Horovitz FG. Analysis of Potential field data in the wavelet domain. Geophysical Journal International, 1999; 137: 175–196.
- [24] Ketin İ. Türkiye'nin Orojenik Gelişmesi. MTA Dergisi, 53, Ankara, 1959.

- [25] Kuzucuoglu C, Çiner A, Kazancı N. Landscapes and Landforms of Türkiye. Springer Berlin Heidelberg, 2019.
- [26] Maden N, Elmas A. Major tectonic features and geodynamic setting of the Black Sea Basin: Evidence from satellite-derived gravity, heat flow, and seismological data. Tectonophysics, 2022; 824: 229207 (DOI: https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229207).
- [27] Okay AI. High pressure/low temperature metamorphic rocks of Turkey. In: Blueschists and Eclogites (ed. B.W. Evans and E.H. Brown). Geological Society of America Memoir, 1986; 164: 333-348.
- [28] Okay AI, Tüysüz O. Tethyan sutures of northern Turkey. In "The Mediterranean Basins: Tertiary extension within the Alpine orogen" (eds. B. Durand, L. Jolivet, F. Horváth and M. Séranne). Geological Society, London, Special Publication, 1999;156: 475-515.
- [29] Oldenburg DW. The inversion and interpretation of gravity anomalies. Geophysics, 1974; 39: 526–536.
- [30] Oruç B, Gomez-Ortiz D, Petit C. Lithospheric flexural strength and effective elastic thicknesses of the Eastern Anatolian and surrounding region. Journal of Asian Earth Sciences, 2017; DOI: https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.09.015
- [31] Oruç B, Balkan E. Stress field estimation by the geoid undulations of the Samos-Kuşadası Bay and implications for seismogenic behavior. Acta Geophysica, 2021; 69(3): 1137-1149.
- [32] Oruç B, Keskinsezer A. Structural setting of the northeastern Biga Peninsula (Turkey) from tilt derivatives of gravity gradient tensors and magnitude of horizontal gravity components. Pure Applied Geophysics, 2008; 165: 1913-1927.
- [33] Oruç B. Edge detection and depth estimation using a tilt angle map from gravity gradient data of the Kozaklı-Central Anatolia Region, Turkey. Pure and Applied Geophysics, 2010; DOI: 10.1007/s00024-010-0211-0.
- [34] Oruç B. Teori ve Örneklerle Gravimetri. ISBN: 978-605-5936-65-5, Umuttepe Yayınları, 2012.
- [35] Parker RL. The rapid calculation of potential anomalies. Geophysical Journal International, 1973; 31: 447–455.
- [36] Pavlis NK, Holmes SA, Kenyon SC, Factor JK. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008. EGU General Assembly 2008, Vienna, Austria. 2008; http://earthinfo.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008 (Ziyaret tarihi: 11 Şubat 2017).
- [37] Phillips JD. Locating magnetic contacts; a comparison of the horizontal gradient, analytic signal, and local wavenumber methods, Society of Exploration Geophysicists, Abstracts with Programs (Calgary 2000) 2000: 402–405.
- [38] Rapolla A, Cella F, Fedi M, Florio G. Improved techniques in data analysis and interpretation of potential fields: Examples of application in volcanic and seismically active areas. Annals of Geophysics, 2002;45: 6.
- [39] Saibi H, Nishijima J, Ehara S. Processing and interpretation of gravity data for the Shimabara Peninsula Area, Southwestern Japan Memoirs of the Faculty of Engineering. Kyushu University 2006; 66: 2.
- [40] Sançar T, Zabcı C, Karabacak V, Yazıcı M, Akyüz HS. Geometry and Paleoseismology of the Malatya Fault (Malatya-Ovacık Fault Zone), Eastern Türkiye: Implications for intraplate deformation of the Anatolian Scholle. Journal of. Seismology, 2019; 23(2): 319–340.
- [41] Sönmez T, Oruç B. Doğu Marmara Bölgesinin Moho Derinliklerinin Gravimetrik ve İzostazik Yöntemlerle Kestirimi ve Kabuk Denge Analizleri. Yerbilimleri, 2017; 38(2): 115–128.
- [42] Spector A, Grant FS. Statistical models for interpretation aeromagnetic data. Geophysics, 1970; 22: 359-383.
- [43] Şengör AMC. Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of Anatolia and surrounding regions. Bulletin. Burgers Research Geological Minerals, 1980: 115–137.
- [44] Şengör AMC, Yılmaz Y. Tethyan evolution ol Turkey: A plate tectonic approach. Tectonophysics, 1981; 75: 181 241.
- [45] US Geological Survey, Digital Elevation Models GTOPO30. Virginia, 1998. http://webmap.ornl.gov/wcsdown/wcsdown.jsp?dg_id=10003_1, (Ziyaret tarihi: 11 Şubat 2017).
- [46] Yadav K, Singh SK. Morpho-tectonic assessment of Central Northern escarpment of Peninsular India, based on tectonically sensitive geomorphic indices. Physical Geography, 2022; 43(6): 753–783.



Adıyaman University Journal of Engineering Sciences Adyü J Eng Sci 2025;12(25):143-158

Iyu J Eng Sci 2025;12(25):143-158 Adıyaman Üniversitesi

Research Article / Araştırma Makalesi

Mühendislik Bilimleri Dergisi Adyü Müh Bil Derg 2025;12(25):143-158

https://doi.org/10.54365/adyumbd.1652866

Automation of a Multi-Station Rotary Bending Fatigue Test Machine with PLC Control System

Çok İstasyonlu Döner Eğilmeli Yorulma Test Makinesinin PLC Kontrol Sistemi ile Otomasyonu

Abdurrahman Doğan ¹*^(D), Kürşad GÖV ²^(D), İbrahim GÖV ²^(D)

¹ Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü,Gaziantep, Türkiye

² Gaziantep Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, 27310, Türkiye

Abstract

Rotating bending fatigue tests are crucial for assessing material fatigue strength in both industrial and academic contexts. While standards such as the AISI and ISO define test methodologies, automation and control have mechanisms not been sufficiently investigated. This study presents the automation of a 22-station fatigue testing system with PLC control. Inductive sensors detect real-time specimen fractures, transmitting signals to the PLC, which autonomously tracks cycles, identifies failures, and terminates tests. A rotary encoder (40 pulses/rev) refines cycle monitoring, whereas an HMI panel enables real-time visualization and parameter adjustments. This automation system significantly improves test accuracy, reliability, and repeatability, offering substantial advantages for material fatigue assessments in industrial and academic applications.

Öz

Döner eğilmeli yorulma testleri, hem endüstriyel hem de akademik bağlamlarda malzeme yorulma mukavemetini belirlemek için çok büyük öneme sahiptir. AISI ve ISO gibi standartlar test yöntemlerini tanımlasa da, bu testlerin otomasyon süreçleri yeterince araştırılmamıştır. Bu çalışma 22 istasyonlu bir yorulma test sisteminin ve PLC kontrollü otomasyonunu içermektedir. Endüktif sensörler, gerçek zamanlı numune kırılmalarını tespit ederek, PLC'ye sinyaller iletir, böylece PLC döngüleri otonom olarak izler, arızaları tanımlar ve testleri sonlandırır. 40 pulse/rev çözünürlüklü bir rotary encoder hassas çevrim izlemesi sağlarken, HMI paneli anlık veri takibi ve parametre düzenlemelerine imkân tanımaktadır. Bu otomasyon sistemi, test doğruluğunu, güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini önemli ölçüde artırarak endüstriyel ve akademik uygulamalarda malzeme yorulma analizleri için ciddi avantajlar sunar.

Keywords: Rotating bending fatigue test, PLC	Anahtar Kelimeler: Döner eğilme yorulma testi, PLC
control, Automation, HMI interface	kontrolü, Otomasyon, HMI arayüzü

^{*} Corresponding e-mail (Sorumlu yazar e-posta): <u>abdurrahman.dogan@gibtu.edu.tr</u> **Received (Geliş Tarihi):**06.03.2025, **Accepted (Kabul Tarihi):** 16.04.2025

1. Introduction

In industrial use, damage occurs mostly when materials are loaded under variable loads. Predicting the behaviour of materials under such dynamic loading is very important in the field of structural design. Engineering materials that are damaged under dynamic loads much lower than their current static strength; such a dynamic failure mechanism is called fatigue. Rotating bending fatigue tests are used to determine the fatigue strength of materials and play a critical role in industrial and academic research [1, 2]. These tests determine the fatigue characteristics of rotating machine elements under cyclic loading as a result of the bending effect [3, 4]. A great deal of information is available on the application procedures of these tests, such as many standards (AISI and ISO) and a considerable amount of academic work. However, there is not enough information in the literature in the field of control of the test systems that perform these tests.

Electronic components may vary depending on the specific system design, but the principles of cycle counting methods are generally similar for rotary bending fatigue test setups. One widely adopted method reported in the literature relies on proximity sensors that generate signals each time a predetermined reference point on a rotating spindle completes a revolution, incrementing the cycle count accordingly [1-3, 5, 6]. Moving beyond this conventional method, Yamamoto et al. [4] introduced an alternative approach employing photoelectric sensors. Similarly, Gentile et al. [7] utilized high-precision encoders integrated with computer-controlled real-time data acquisition systems for cycle-counting tasks. Small (e.g., 6 or 10 digits) LCD screens are generally preferred for data display in single specimen test systems [2, 5]. However, digital counters are also frequently used for cycle counting [1, 2, 5, 6, 8]. Yamamoto et al.[4] developed a system consisting of four test stations, each equipped with a separate 16x2 LCD screen, to independently monitor specimen cycle life in a multispecimen test configuration. To improve operational ease and optimize data management, this research team subsequently integrated a human-machine interface (HMI) panel into the setup to simplify the data input and output processes [9]. Similarly, Gentile et al. provided a data display process involving real-time data transfer via computer connections [7]. Unlike other studies, Isakov et al. [3]. used a data acquisition system (DAQ) instead of a microcontroller-based controller and preferred to perform all data processing during the test through this system. Other studies in the literature do not provide details about the control system, and some of them do not even use advanced control elements such as microcontrollers.

Today, the design and control approaches of a rotating bending fatigue test system are largely standardized, but the need for more advanced control systems that can meet industrial needs is increasing. Since statistical repeatability is of critical importance in fatigue testing, significant efforts are being made to develop multistation test systems in terms of both mechanical and electronic control. Particularly critical is the ability to rapidly and synchronously acquire and display data from each testing station. The methodologies demonstrated by Gentile and Yamamoto provide notable frameworks for achieving synchronized data processing and visualization in multistation rotating bending fatigue tests[4, 7, 9]. Moreover, the ability to independently manage multiple concurrent experiments within a single machine environment continues to drive innovation, inspiring novel and industrially viable test system designs. With the aim of addressing this gap in the literature, this study describes an automation process in a rotating bending fatigue test unit consisting of 22 stations. Employing a PLC-based automation architecture facilitates precise real-time data acquisition and streamlines algebraic computations, significantly improving overall operational accuracy and efficiency[10]. During the cyclic loading of the specimen at the machine stations, the PLC monitors the life span values in real time. Moreover, the PLC is also used to detect damage and autonomously terminate the test.

The HMI panel is integrated into the system for external data input and reading existing data in the test unit. Certain control commands are given through the HMI panel, while at the same time, it is possible to make some parametric operating settings. Instantaneous monitoring of rotary encoder data with a resolution of 40 pulses/rev, which enables precise tracking of speed counting, is also carried out through this interface.

Additionally, to detect the presence of damage to the specimens in the automation process, inductive sensors are placed at each station. In the case of damage to the test specimens, which are monitored in real time via PLC, the life data are permanently determined as the number of cycles and the other stations continue the test. After the test, the life data of the specimen can be displayed via the HMI panel. Inductive sensor signals are monitored instantaneously at each station during the test, and when the specimen breaks at all stations, the machine stop command is automatically derived via the PLC algorithm. In this study, the completed electronic equipment, machine automation and operating characteristics of a rotating bending test unit consisting of 22 stations are analysed. The findings and the contribution of the machine to the literature are discussed in section 4.

2. Materials and methods

The literature reveals that most existing systems rely on manual or semiautomated testing processes. These systems are typically limited to testing a small number of specimens, with cycle counting performed via manual counters or basic digital sensors.

In this context, the fully assembled 22-station rotating bending fatigue test device, as depicted in Figure 1, distinguishes itself from existing methods because of its high efficiency, fully automated operation, and precision data acquisition capabilities. This section presents the electrical connections of the machine, the mechanical assembly of its electronic components, and an analysis of its operational characteristics.



Figure 1. Final assembled configuration of the test unit.

2.1. Inductive sensor

Inductive sensors are widely used for detecting metals and other conductive materials that enter their generated electromagnetic field. These sensors produce a signal upon detecting a suitable object within a specific sensing range. The generated signals are utilized to monitor and control the specimen status in the automation process of the test unit.



Figure 2. Schematic representation of the wiring diagram between the PLC and inductive sensor

In the test unit with 22 stations, the sensors positioned on the idler weights of the specimens provide very effective control to check the rupture conditions. In the automation process using a Delta DVP 14-SS series PLC, one inductive sensor was used at each test station. The wiring diagram of the inductive sensor used in the study for the PLC is shown in Figure 2.





A comprehensive wiring schematic illustrating the integration of inductive sensors across all 22 test stations is presented in Figure 3. This schematic provides an overview of the connection architecture and sensor distribution throughout the testing system.

The mechanical framework of the test unit is designed to ensure effective monitoring across multiple stations. In this configuration, specimens are subjected to loading through idler weights attached to their free ends. These idler weights serve as a mechanism for applying force during fatigue testing. Inductive sensors are strategically positioned above these weights, enabling the precise detection of specimen conditions throughout the test. A schematic representation of the mechanical placement of sensors within the multistation setup is provided in Figure 4.



Figure 4. Methodology for the mechanical integration of inductive sensors in a multistation fatigue testing machine.

While the specimen remains intact, the inductive sensor generates a signal, activating the indicator light. Upon reaching a determined cycle count and subsequent specimen fracture, the sensor signal is interrupted, causing the indicator light to turn off. This process is schematically represented in Figure 5. The specimen status at each station is controlled in real time with the signal generated in this way. When a specimen fractures, the ongoing cycle count is instantly logged as permanent data, and counting ceases for the corresponding station, even as the machine continues operation. Consequently, the fatigue life of a material, measured in cycles, is precisely determined.

Within the PLC-based automation system, this methodology ensures comprehensive tracking of specimen failures across all stations. Additionally, a self-terminating mechanism was integrated, allowing the test unit to automatically halt upon completion of all the fatigue tests.



Figure 5. Specimen status detection via an inductive sensor signal: (a) Intact specimen, (b) Fractured specimen.

2.2. Rotary Encoder

The rotary encoder is a critical component in motion tracking applications, providing high-precision feedback by converting mechanical movement into electrical signals. This enables continuous and accurate monitoring of key parameters such as speed, position, and direction in rotating systems. In this study, an Autonics E50S-8-40-3-N-24 incremental rotary encoder was employed to facilitate precise cycle counting. A detailed wiring schematic illustrating the integration of the rotary encoder with the PLC is presented in Figure 6, outlining the necessary electrical configuration for seamless data acquisition and system functionality.



Figure 6. Schematic diagram of rotary encoder integration with the PLC.

For the mechanical installation of the rotary encoder onto the machine body, a dedicated mounting bracket and an encoder housing were designed. Figure 7 illustrates the systematic integration of the rotary encoder into the sheet metal frame of the machine. Additionally, a detailed perspective view of the encoder's attachment to the main drive shaft is presented in Figure 8.



Figure 7. Schematic representation of the rotary encoder's mechanical integration with the machine's metal frame.



Figure 8. Mounting configuration of the rotary encoder on the main drive shaft

A 32-bit counter from the PLC registers was utilized for encoder-based cycle counting. These registers support bidirectional counting up to ±2,147,483,647. To accurately determine the number of rotations, a rotary encoder with a resolution of 40 pulses per revolution was employed. The counting limit of the test unit is defined in Equation (1).

Count limit = 2147483647 pulse *
$$\frac{1}{40 \frac{pulse}{rev}}$$
;
= 53 687 091 rev (1)

On the basis of this limit, the machine can achieve over 53 million cycles, making it suitable for evaluating the fatigue behavior of nearly all metal types via this well-established system.

2.3. AC Motor Drive (VFD System)

A variable frequency drive (VFD) is a power electronics device designed to regulate the speed, torque, and direction of AC motors. Unlike conventional direct grid-connected motor systems, which operate exclusively at full speed and require mechanical braking, VFD technology enables precise digital control of motor speed profiles. In the test unit, a Delta VFD-M 5.5 kW drive was implemented for motor control (Figure 9).



Figure 9. Schematic representation of the motor driver connection to the PLC and AC motor.

2.4. HMI Interface Panel

The human–machine interface (HMI) panel serves as the primary interaction point between the operator and the PLC controlling the fatigue testing system. Through this interface, operators can monitor system status, adjust parameters, and execute control commands in real time. The developed control system uses a Delta DOP-AS38-BSTD series HMI panel.



Figure 10. Designed HMI control screens: (a) main control screen, (b) station-wide cycle count display, (c) encoder reset and preshutdown delay configuration, and (d) encoder reset confirmation screen.

The HMI panel is connected to the PLC via the RS485 industrial communication protocol, ensuring seamless data exchange. Its core functionalities include the following:

• **Start/stop control:** Operators can initiate or halt the test process via the touchscreen interface. The main control screen, designed for this function, is shown in Figure 10(a).

• **Parameter Configuration:** Users can reset encoder data and set automatic shutdown timing upon test completion. These adjustments are made through the HMI screens shown in Figures 10(b) and 10(c).

• **Real-time data monitoring**: The cycle count, sensor status, and system diagnostics are continuously displayed for operator oversight. The station data monitoring screen, designed for this purpose, is presented in Figure 10(b).

The integration of the HMI panel into the system enhances operator interaction, improving both the control and traceability of the fatigue testing process while optimizing operational efficiency. Figure 11 illustrates the overall connection architecture of the developed control system. The HMI panel enables operator interaction with the PLC, allowing external control of the system.



Figure 11. Control architecture comprising the HMI panel, Delta PLC, sensors, and motor drive.

The PLC derives power from a dedicated supply unit to ensure stable operation. Given the limited availability of digital input channels, a Delta DVP-16SM expansion module has been incorporated to increase the input capacity. The PLC continuously processes signals from 22 inductive sensors and a rotary encoder, facilitating real-time system surveillance and execution of critical control functions.

The output signals generated by the PLC are employed for parametric adjustments via a variable frequency drive (VFD). The VFD, in turn, interprets and executes these commands with high precision, modulating motor speed and direction accordingly.

Additionally, the HMI panel facilitates interaction with all system components via the PLC, enabling seamless data reading and writing operations. This architecture enhances operator control while optimizing process traceability and manageability. The complete operational framework of the system is outlined in the flow diagram presented in Figure 12.



Figure12. Process flow chart

3. Results

3.1. Test specimens and preliminary fatigue test outcomes

AISI 304 stainless steel specimens were employed for preliminary fatigue assessments. The test samples were machined to precise geometrical specifications prior to testing, ensuring uniformity across all test stations. Figure 13 illustrates a pre-test specimen.



Figure 13. AISI 304 stainless steel specimen before fatigue testing.

After testing, clear distinctions were observed between fractured and unfractured specimens. The failed specimens exhibited visible surface cracks and complete breakage, whereas the surviving specimens endured cyclic loading within the endurance limit. The posttest conditions of these samples are presented in Figure 14.



Figure 14. Fractured and unfractured AISI 304 stainless steel specimens after the fatigue test and stress values applied to these specimens.

3.2. General observations from the S–N curve

To validate the accuracy and efficiency of the automated test system, preliminary fatigue tests were conducted on AISI 304 stainless steel specimens. The endurance limit was estimated on the basis of a set of seven stress levels recorded through a single trial per level. The resulting S–N curve is depicted in Figure 15.



Figure 15. S–N curve for AISI 304 stainless steel, illustrating preliminary fatigue test results.

The results demonstrate a decreasing trend in fatigue strength with increasing cycle count, as expected in high-cycle fatigue scenarios. The endurance limit appears to stabilize at approximately 419.5 MPa, which is closely aligned with the literature. According to ASM Handbook Vol. 19 on Fatigue and Fracture, the endurance limit for 10% CW (cold-worked) AISI 304 stainless steel in rotating bending fatigue tests is reported to be 60 ksi (approximately 414 MPa)[11]. The similarity between the obtained endurance limit and the reference value suggests that the developed system provides accurate and reliable fatigue data. While these preliminary findings confirm the effectiveness of the PLC-controlled system, a more extensive statistical evaluation of fatigue behavior will be conducted in a subsequent study. The gathered data confirm that the developed system provides a reliable platform for fatigue testing with high repeatability and accuracy.

4. Discussion

To contextualize the developed system within the literature, Table 1 presents a comparative analysis of various rotating bending fatigue testing machines. The table summarizes key technical aspects, including machine configuration, load application mechanisms, and automation features.

Study	Application Type of Rotating Bending Fatigue	#Specimen	Sensor for Counting	Cycle Tracking Method	Controller Type	Data Visualization.
<i>Ali</i> et al. [1]	4-Point Bending	1	Proximity sensor	8-digit counter	No Controller was Used	2x16 Lcd screen
Kattimani et al. [2]	4-Point Bending	1	Proximity sensor	6-digit counter	No Controller was Used	6 digit LCD screen
Isakov et al. [3]	4-Point Bending	1	Inductive sensor	DAQ System	IMC Cronos PL2 Data Acquisition System	Not Specified
Yamamoto et al. [4]	Dual-Spindle Cantilever Type Rot. Bending Fatigue	4	Photo sensor	Not specified		A total of four 4×16 LCD screens were utilized, with one screen allocated for each sample.
Alaneme [5]	Cantilever Type Rot. Bending Fatigue	1	Proximity sensor	6-digit counter	No Controller was Used	6 digit Lcd screen

Table 1. Comparative analysis of existing studies

Continuation of Table 1								
Study	Application Type of Rotating Bending Fatigue	#Specimen	Sensor for Counting	Cycle Tracking Method	Controller Type	Data Visualization.		
<i>R. Mali</i> et al. [6]	4-Point Bending	1	Proximity sensor	6-digit counter	No Controller was Used	2x16 Lcd screen		
<i>Gentile</i> et al. [7]	4-Point Bending	5	Encoder	PC-based cycle counting of each specimen is done separately by using encoder	PC-based system is used			
Ç <i>ipil</i> et al. [8]	4-Point Bending	1	Lap Counter sensor	10-digit counter	No Controller was Used	2x16 Lcd screen		
Yamamoto et al. [9]	Dual-Spindle Cantilever Type Rot. Bending Fatigue	4	Not specified	Not specified		HMI screen		
Chauhan et al. [12]	4-Point Bending	1	Not specified	Not specified	No Controller was Used	Not specified		
M. Banavasi et al. [13]	4-Point Bending	1	Not specified	Not specified Not :		Not specified		

The comparison highlights the distinctive advantages of the proposed system, particularly in terms of automation efficiency, real-time failure detection, and high-precision cycle tracking. These aspects are critical for ensuring reproducibility in fatigue testing.

The key advantages of the developed test unit can be analysed as follows:

I. Automation: Previous studies by Ali et al. [1], Kattimani et al. [2], Alaneme [5], Chauhan et al. [12], Çipil et al. [8], and R. Mali et al. [6] did not incorporate any automated control mechanisms in their experimental setups; instead, they relied solely on manual operation. Similarly, Yamamoto et al. [4, 9] and M. Banavasi et al. [13] did not provide any details regarding the control systems used in their investigations. In contrast, Isakov et al. [3] opted for an IMC Cronos PL2 Data Acquisition System as an alternative to conventional controllers. Gentile et al. [7] advanced beyond these approaches by implementing a computer-based application, enabling the controlled testing of five specimens in real time. Despite these advancements, the present study represents a significant improvement by enabling the autonomous testing of 22 specimens through a PLC-controlled system. This approach not only enhances the efficiency and precision of the testing process but also ensures repeatability through an industrial-grade control system. Moreover, pioneering studies integrate an industrial PLC control system within this testing framework.

II. Precision in cycle counting: Conventional methodologies for cycle counting typically employ apparatuses such as proximity sensors [1-3, 5, 6], photo sensors [4], and mechanical lap counters [8], each of which registers a single count per revolution. In their study, Gentile et al. [7] implemented a more sophisticated approach by using individual encoders for each specimen to improve counting accuracy. The system developed in this study introduces significant advancements by incorporating an industrial-grade rotary incremental encoder (40 pulses/rev), ensuring superior precision in cycle tracking. This encoder, which is directly coupled to the machine's main drive shaft through a precision coupling mechanism, substantially enhances the measurement accuracy. By centralizing cycle counting across all machine stations, a robust, repeatable, and high-precision monitoring framework is established.

III. Enhanced failure detection: In manually operated systems utilizing mechanical counters, the counting process ceases automatically upon specimen failure. In contrast, digital counters without a dedicated controller rely on cycle signals generated by sensors to increase the displayed count on an LCD screen [1, 2, 5, 6, 8]. In such cases, when a specimen breaks, the counting process is typically halted by triggering a switch or similar mechanism to stop the motor. However, in multispecimen applications, a

more sophisticated solution is needed to manage this issue effectively. In the control system developed, inductive sensors, which are conventionally used for cycle counting, have been adapted to detect specimen breakage. When a specimen breaks, the corresponding station cycle data are immediately fixed, and counting is halted for that specific station while the remaining stations continue uninterrupted. Moreover, testing and cycle counting continue uninterrupted at the remaining stations. This failure detection mechanism is continuously monitored by the PLC across all stations. Once all the specimens fail, the test autonomously ceases operation.

IV. Advanced real-time monitoring: The methods used for data visualization in experimental studies vary significantly. In conventional approaches that use digital counters, tracking measurement data is typically conducted through a small LCD screen [1, 2, 4-6, 8]. Gentile et al. [7] successfully implemented a computer-based software system in their test setup, which evaluated five specimens, enabling real-time monitoring of cycle count data for all specimens.In the present study, which incorporates an industrial control system, an advanced human–machine interface (HMI) panel was integrated into the system. This integration facilitates real-time data visualization for fatigue testing across 22 stations. Additionally, the HMI panel serves as an interface for configuring machine parameters and executing critical operational commands, thereby enhancing system functionality and user control.

V. Endurance limit consistency: The experimentally determined endurance limit (419.5 MPa) aligns closely with literature-reported values for cold-worked AISI 304 stainless steel. According to ASM Handbook Vol. 19, the endurance limit for 10% CW AISI 304 stainless steel in rotating bending fatigue tests is approximately 60 ksi (~414 MPa). This strong agreement confirms the accuracy and reliability of the developed test system[11].

4.1. Machine Performance Evaluation

The automation system demonstrated superior operational efficiency by eliminating manual intervention in failure detection and cycle counting. The use of high-resolution rotary encoders and inductive sensors ensures precise real-time monitoring, significantly reducing measurement errors. Moreover, the HMI provides an intuitive platform for data acquisition, making the testing process seamless and user friendly.

5. Conclusion

The comparative evaluation of the fatigue testing systems highlights the unique advantages of the developed PLC-controlled multistation rotating bending fatigue test machine. The system's automated failure detection, real-time cycle tracking, and precise endurance limit estimation distinguish it from conventional fatigue test setups. The findings confirm that this system offers a highly repeatable, accurate, and efficient fatigue testing method applicable to both academic research and industrial applications.

Future research will focus on integrating additional control algorithms to refine the accuracy of cycle tracking and extend the machine's applicability to various material types.

Acknowledgements

The project was supported by the Scientific Research Project (BAP) Unit of Gaziantep University. Project Number: HUBF.DT.22.03

Declaration of Contribution

Kürşad Göv and İbrahim Göv contributed to the idea of automation with PLC, the creation of the research methodology, and the writing of the article, and Abdurrahman Doğan contributed to the installation of the hardware components in the article and the installation of the necessary software.

Conflict of interest declaration

The author(s) of the article declare that there are no personal or financial conflicts of interest within the scope of the study.

References

- [1] Ali S, Tahir MH, Saeed MA, Zaffar N, Khan MK. Design and development of fatigue machine: Rotating bending fatigue testing on different materials. International Journal of Advanced Engineering and Management 2019;4(2):8–15.
- [2] Kattimani MA, Khatib MI, Ghori MM, Sajjad MA, Jahangir S, Baqtaiyan H, Sadiq M. Design and fabrication of fatigue testing machine. International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology 2020;7(1):295–304.
- [3] Isakov M, Rantalainen O, Saarinen T, Lehtovaara A. Large-scale fatigue testing based on the rotating beam method. Experimental Techniques 2023;47(3):553–563.
- [4] Yamamoto T, Kokubu A, Sakai T, Nakamura Y. Development and fundamental performance of dualspindle rotating bending fatigue testing machine with special device providing corrosive environments. In: Asia Pacific Conference on Fracture and Strength – Mechanics and Materials (APCFS-MM2012), Japan; 2012.
- [5] Alaneme KK. Design of a cantilever-type rotating bending fatigue testing machine. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering 2011;10(11):1027–1039.
- [6] Mali PR, Chavan US. Design and development of rotating bending fatigue test-rig. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research 2018;5(7):578–586.
- [7] Gentile D, Martorelli M. Design and realization of a multisamples rotating high cycle fatigue machine. Frattura ed Integrità Strutturale 2012;22:85–92.
- [8] Çipil M, Karabudak F, Zamanlou H. Design and manufacturing of rotating bending fatigue test machine. The European Journal of Research and Development 2024;4(2):77–95.
- [9] Yamamoto T, Lian B, Gotoh K. Relationship between temperature property and loading frequency of rotating bending fatigue testing machine of cantilever type. In: International Conference on Very High Cycle Fatigue (VHCF), Dresden, Germany; 2017.
- [10] Polat Ö, Bulut MC, Dönmez İ, Özsoy K. PLC ve SCADA entegrasyonlu hidroelektrik santralin prototip tasarımı, imalatı ve 3B yazıcı ile türbin üretimi. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2021;8:253–267.
- [11] ASM International Handbook Committee. ASM Handbook Volume 19: Fatigue and Fracture. ASM International; 1996.
- [12] Chauhan SJ, Misal A, Jadhav A, Jadhav R, Bhalavi A, Jagdale R. Design and fabrication of rotating bending fatigue testing machine a laboratory development project. International Research Journal of Engineering and Technology 2016;3(4):816–819.
- [13] Banavasi SM, Ravishankar KS, Naik PS. A review on design and fabrication of fatigue testing machine. International Journal of Novel Research and Development 2018;3(5):5–9.