



JIENS

Journal of Innovative Engineering and Natural Science

Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi



**JOURNAL OF INNOVATIVE ENGINEERING
AND NATURAL SCIENCE**

**YENİLİKÇİ MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ
DERGİSİ**

e-ISSN: 2791-7630

Yalova – Turkey

<i>Year / Yıl</i>	<i>Volume / Cilt</i>	<i>Issue / Sayı</i>
2022	2	2



JIENS

Journal of Innovative Engineering and Natural Science
Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi

Journal Cover Design / Dergi Kapak Tasarımı: İdris Karagöz

Journal Cover Artwork / Dergi Kapak Resmi: Fatma Aleyna Ceylan



Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

journal homepage: <https://jiens.org>



Product Information / Ürün Bilgisi

Publisher
Yayıncı

İdris Karagöz

Owner
Sahibi

İdris Karagöz

Editor-in-Chief
Baş Editör

İdris Karagöz

Publishing Manager
Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

İdris Karagöz

e-ISSN Number
e-ISSN Numarası

2791-7630

Web Page
Web Sayfası

<https://jiens.org>

Date of Online Publication
Online Basım Tarihi

27.07.2022

Language
Dili

English / Turkish
İngilizce / Türkçe

Frequency
Yayın Aralığı

Published two times in a year
Yılda iki kere yayınlanır

Type of Publication
Yayın Türü

Periodical
Sürelili yayın

Abstracted and indexed in
Tarandığı ve Özetlendiği Dizinler

Telephone
Telefon

+90 (226) 815 55 53

Fax
Faks

+90 (226) 815 54 00

E-mail
E-posta

jiens@jiens.org

Correspondence Address
Yazışma Adresi

Yalova University Faculty of Engineering, Yalova University
Central Campus, On the Çınarcık Road 77200 Yalova, Turkey

*Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Yalova Üniversitesi
Merkez Yerleşkesi, Çınarcık Yolu Üzeri 77200 Yalova, Türkiye*



Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

journal homepage: <https://jiens.org>



Editor-in-Chief Baş Editör

İdris Karaagöz

Associate Editors Yardımcı Editörler

Julide Hızal Yücesoy, Yalova University, Turkey
Yahya Bozkurt, Marmara University, Turkey
Ayşe Bedeloğlu, Bursa Technical University, Turkey
Khalid Zaki Elwakeel, Port Said University, Egypt
Pelin Baran, Yalova University, Turkey
Ilda Kazani, Polytechnic University of Tirana, Albania
Mesut Yılmazoğlu, Yalova University, Turkey
Mandana Adeli, Iran University of Science and Technology, Iranian
Mehmet Buğdaycı, Yalova University, Turkey
Şeyda Korkmaz, Yalova University, Turkey
Özlem Tuna, Yalova University, Turkey

Editorial Board Alan Editörleri ve Yayın Kurulu

Zakaria Bumerzoug, University of Biskra, Algeria
Gürel Çam, İskenderun Technical University, Turkey
Kulathuier Seshan, University of Twente, Netherlands
Edin Dolićanin, State University of Novi Pazar, Serbia
Levan Chkhartishvili, Georgian Technical University, Georgia
Emel Taban, Kocaeli University, Turkey
Sinan Şen, Yalova University, Turkey
Uğur Öz Saraç, Sakarya University of Applied Sciences, Turkey
Mehmet Özgür Seydibeyoğlu, İzmir Katip Çelebi University, Turkey
İsmail Gökhan Temel, Yalova University, Turkey
Erol Erçağ, Tekirdağ Namık Kemal University, Turkey
Salih Yazıcıoğlu, Gazi University, Turkey
Melda Altıkatoğlu Yapaöz, Yıldız Technical University, Turkey
Kadriye Tuzlakoğlu, Yalova University, Turkey
Ayşe Erçağ, İstanbul University-Cerrahpaşa, Turkey
Figen Beyhan, Gazi University, Turkey
Naci Genç, Yalova University, Turkey
Eyüp Debik, Yıldız Technical University, Turkey
Barbaros Nalbantoğlu, Yıldız Technical University, Turkey
Mustafa Yavuz, Süleyman Demirel University, Turkey
Ilda Kazani, Polytechnic University of Tirana, Albania

Editorial Board
*Alan Editörleri ve
Yayın Kurulu*

Oğuzhan Gündüz, Marmara University, Turkey
Stanislav Roshchupkin, Sevastopol State University, Sevastopol
Müge Balkaya, İstanbul Technical University, Turkey
Mustafa Çakır, Marmara University, Turkey
Halil İbrahim Kurt, Gaziantep University, Turkey
İsrafil Küçük, Gebze Technical University, Turkey
Mehmet Büyükyıldız, Bursa Technical University, Turkey
Yeşim Müge Şahin, Arel University, Turkey
İlyas Kartal, Marmara University, Turkey
Mahmut Yıldız, Gebze Technical University, Turkey
Turgut Ak, National Defence University, Turkey
Mustafa Gürbüz, Ağrı İbrahim Çeçen University, Turkey
Gökhan Açık, Piri Reis University, Turkey
Mehmet Berat Taşkın, University of Würzburg, Germany
Mandana Adeli, Iran University of Science and Technology, Iranian
Mehmet Arif Kaya, Yalova University, Turkey
Asst. Prof. Dr. Mithat Çelebi, Yalova University, Turkey
Ayça Bal, İstinye University, Turkey
Fuat Kosanoğlu, Yalova University, Turkey
Mehmet Ertem, American University of Sharjah, United Arab Emirates
Tai-Cheng Chen, Institute of Nuclear Energy Research, Taiwan
Levent Öncel, Sinop University, Turkey
Murat Alkan, Dokuz Eylül University, Turkey
Ömer Yunus Gümüş, Bursa Technical University, Turkey
Abdussamet Subaşı, İstanbul Technical University, Turkey
Alperen Bal, Yalova University, Turkey
Raheem Al-Sabur, University of Basrah, Iraq

Advisory Board
Danışma Kurulu

Serdar Salman, National Defence University, Turkey
Fehim Fındık, Sakarya University of Applied Sciences, Turkey
Nizamettin Kahraman, Karabük University, Turkey

From the Editors

Journal of Innovative Engineering and Natural Science (JIENS) intends to provide an academic meeting platform for researchers who conduct research in the field of engineering and natural sciences, present possible solutions in line with scientific approach for existing problems in these disciplines and have the request to share their scientific studies in the fastest way possible with academia and industry.

Regarding our vision driven by “academic discipline” and “ethical values”, we are greatly pleased to announce you that the **second issue** of Journal of Innovative Engineering and Natural Sciences (JIENS) has been published. We acknowledge our respect and appreciation to people who encourage and support us. Following are some of those whom we shall always thank to their various contributions: our editorial board members, referees and authors who willing to publish their valuable researches in our journal.

By publishing our July 2022 issue gained enthusiasm we would like to be one of exclusive journals in national and international areas. We would like you to share your precious studies in the fields of engineering and natural sciences with us for following issues.

Editörden

Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi, kuruluşu itibarıyla, mühendislik ve doğa bilimleri alanında araştırmalar yapan, bu disiplinlerde mevcut sorunlara bilimsel yaklaşımlarla çözümler öneren ve bilimsel çalışmalarını akademi ve sektörle hızlı bir şekilde paylaşma ihtiyacı duyan araştırmacılar için akademik bir buluşma alanı sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu vizyonla, “akademik disiplin” ve “etik değerler” ilkeleri temelinde, dergimiz Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi'nin (JIENS) **2022 Temmuz sayısını** sizlere sunmaktan kıvanç ve mutluluk duyuyoruz. Dergimizin Temmuz sayısında katkıda bulunan, yayın kurulu üyelerimiz, hakemlerimiz ve kıymetli çalışmalarını dergimizde yayınlama teveccühü gösteren yazarlar başta olmak üzere tüm paydaşlarımıza teşekkür ediyoruz.

Bu disiplin ve hevesle, ulusal ve uluslararası ölçekte seçkin dergiler arasında yer alma hedefimizi yineliyor, mühendislik ve doğa bilimleri alanında hazırladığınız değerli çalışmalarınızı gelecek sayılarımızda da bizlerle paylaşmanızı arzu ediyoruz.

CONTENTS / İÇİNDEKİLER

Original Paper Araştırma Makalesi	<i>Hasan Sesli Zeliha Tonyalı Muhammet Yurdakul</i>	47-65	<i>An Investigation on Seismically Isolated Buildings in Near-Fault Region</i>
Original Paper Araştırma Makalesi	<i>Orhan Karpuz Muhammet V. Akpınar Hakan Aslan Muhammet Çelik Elif Çiçek</i>	66-75	<i>Investigation Friction Loss of Concrete Pavement Surface with a New Method</i>
Original Paper Araştırma Makalesi	<i>Furkan Arslan Sunay Türkdoğan</i>	76-94	<i>Determination of rooftop photovoltaic panel installation potential in public buildings and consideration of architectural design for energy production increase: a case study of Yalova</i>
Review Paper Derleme Makale	<i>Neşe Çakır Yiğit</i>	95-113	<i>Current approaches to the synthesis of flame retardant polymers</i>



Araştırma Makalesi

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

journal homepage: <https://jjiens.org>

An Investigation on Seismically Isolated Buildings in Near-Fault Region

ID Hasan Sesli^{a,*}, ID Zeliha Tonyalı^b and ID Muhammet Yurdakul^c^aDepartment of Civil Engineering, The Faculty of Engineering, Yalova University, Yalova, 77200, Turkey.^bDepartment of Civil Engineering, The Faculty of Engineering and Architecture, Recep Tayyip Erdoğan University, Rize, 53100, Turkey.^cDepartment of Civil Engineering, The Faculty of Technology, Karadeniz Technical University, Trabzon, 61830, Turkey.

MAKELE BİLGİSİ

Article history:

Received 30 June 2022

Received in revised form 04 July 2022

Accepted 19 July 2022

Available online

Keywords:

Dynamic behavior

Near-fault ground motion

Far-fault ground motion

Seismic Isolation

ÖZET

In this study, the effects of far-fault, near-fault and pulse-type ground motions on a seismically isolated building were investigated. The 3-dimensional finite element model of the building was created in the SAP2000 software and the dynamic characteristics were determined numerically. Three different earthquake ground motion characteristics of 1999 Düzce Earthquake in Turkey were selected to evaluate the structural behavior. The record motions of the Mudurnu and Sakarya station were selected as far-fault ground motion. For near-fault ground motion, 1999 Düzce Earthquake Düzce and Lamont 1062 station records were selected. 1999 Düzce Earthquake Bolu and IRIGM 487 station records were selected as pulse-type ground motion. The behavior of the building supported by friction pendulum isolators with a displacement capacity of 48 cm was compared with the analysis results of fixed-base building. The displacement values of the 1st, 4th and 7th floors of the building were obtained. The effects of earthquake ground motions and isolator were evaluated according to floor displacement values. The seismically isolated building has a less structural demand depending on the vibration mode period under pulse-like near-fault ground motions.

2022 JIENS All rights reserved.

I. INTRODUCTION

Earthquake ground motions are affected by the earthquake magnitude, topographic features, and the geological structure of the ground, as well as the distance of the area under the earthquake to fault. The ground motions close to the fault are quite different from ground motions away from the seismic source. The ground motions, which are at about 20 km from the rupture are generally named as near-fault (NF) ground motions [1-4].

Some recent earthquakes like as Northridge 1994, Kobe 1995, 1999 Chi-Chi etc. are known as a short-duration impulsive motion that exposes the structure to high input energy at the beginning of the motions [5]. These motions have velocity pulse amplitude. This specialty cannot be seen in records obtained far-field (FF) regions [6]. The velocity pulse duration must be larger than 1.00 second and also the ratio of the peak ground velocity (PGV) to the peak ground acceleration (PGA) must be larger than 0.10 second [7].

Two main categories of the NF ground motions are fling-step and forward-directivity, respectively. The fling-step motions cause permanent static displacement in ground, whereas directivity effects do not create permanent displacement. Comparison to the FF ground motions, directivity- effects having the long-period and high-density and the fling-step effect causing permanent static ground displacements, are destructive for structures [8].

*Tel.: +90-533-676-0140; e-mail: hasan.sesli@yalova.edu.tr

In recently, much scientific research has focused on seismic response of the buildings in NF regions. According to a building severely damaged during 1971 San Fernando earthquake, analytical studies of the non-linear dynamic response of single and multiple degree-of-freedom systems to several NF records indicate that very large displacement ductility may result for current levels of code design forces [9]. The nonlinearity of a buildings is very sensitive to the pulse duration relative to the fundamental period as well as to the pulse acceleration relative to the yield resistance seismic coefficient [10]. Such motions cause damage to the structure as well as to its contents, decreasing the probability that the structure can remain functional after the earthquake. Reduce impact of these motions require exceptional design measures for isolation system [11]. For higher PGV/PGA ratio, pulse-like motions do not contribute too much to higher-modes, but relatively low PGV/PGA ratio fairly contributes. For high-rise buildings, pulses in ground motion records do not always contributes from higher modes [12]. Seismic response of SDOF systems or MDOF frame structures built near source region showed that code-prescribed story shear strength patterns lead to a highly non-uniform distribution of ductility demands over the height. For long-period structures, early yielding occurs in upper stories, but also in high ductility occur in bottom stories of low-period structures [13]. If moment-resisting frame structures is strengthened with hinged walls against NF effects, it will be master factor in reducing drift demands at various performance levels [14]. Forward-directivity effects show more instances of higher-mode demand of buildings, but fling-step displacement frequently caused fundamental mode. Ratio of motion pulse to natural period ensure design demand [15]. Retrofitting by using FRP improved stiffness, strength and lateral displacement capacity of structures against to fling-step effect [16]. According to the seismic response of multi-story buildings subjected to NF earthquakes, records with forward-directivity effect induce higher ductility demand compared with ordinary records [17]. The studies on behavior of steel frames subjected to the forward-directivity effect presented that NF motions motivate high modes of the structure, and high response is especially detected [18]. The results of the study on buckling-restrained braced frames showed that NF records caused to higher demands on the structures. Results for fling-step and NF records are very scattered, but in some cases these records have more damages on structure than the others. Reinforced concrete buildings subjected to large deformation requirements under the presence of velocity pulses in velocity time history. In these cases, a considerable amount of energy is needed to be dissipated in one or more cycles of plastic limit. Although, on average, deformation demands are less than those in the NF records, structural systems are subjected to more plastic cycles. Therefore, the cumulative effects of FF records are minor [19]. The behavior of the reinforced concrete buildings subjected to fling-step effect presents that the ratio of the fundamental period to the pulse period plays an important role [20]. Tuned mass damper (TMD) used to mitigate the dynamic response of buildings subjected to FF and NF earthquake showed that more seismic demand are necessary on an induced response for buildings excited by fling-step effect. In addition, soil effect increases the induced responses and alters the role of TMD in reducing the superstructure responses. TMD provide the highest dissipated damping energy for fling effects compared to forward-directivity effects and FF records [21]. To determinate of the effects of NF ground motions, the authors study on nonlinear response of core-wall buildings [22]. The researchers emphasized that higher mode effects increase when the first mode sensitive region moves away from the second mode sensitive region. Additionally, the ratio of pulse period to natural vibration period caused the elongated first mode period under large pulses in NF region. The seismic response of nonlinear masonry structures under NF and FF ground motions showed that NF ground motions may significantly damage the structure than FF ground motions [23]. Nonlinear analysis on efficiency of floor systems showed that response

demand was increased under fling-step compared to forward-directivity which leads to more severe damage to buildings [24]. According to an investigation on behavior of the regular and irregular structures subjected to directivity effects, the high-frequency quantity should not be ignored since it may be thought that the resonance phenomenon occurs at $T_p/T_1=1$ (the ratio of pulse period to first mode period) [25]. In this situation, designers will have two choices: decomposing NF records to their high-or low-frequency components applying the dominant component based on the T_p/T_1 value and using the original ground motions.

In these days, seismically isolation systems have been used for many structures. Quaranta and Mollaioli investigated the use of the equivalent linearization for oscillators to estimate the peak displacement subjected to NF pulse-like earthquakes. The results of the analysis showed how the predictive ability of the equivalent linear model depends on the ratio between the elastic period of the ground motion and the impact period. Furthermore, the results show that the proposed correction leads to more robust and accurate predictions, especially for low cure rate values and medium-large impact times [26]. Wang et al. investigated the seismic responses of an isolated bridge with lead rubber bearing under NF ground motions [27]. Hysteretic models of lead rubber bearings are used to execute nonlinear time history analysis. Results indicate that the reactions of seismically isolated bridges are significantly influenced by ambient temperature, initial displacement, and lead core heating. Sodha et al. studied on a nonlinear mathematical model and seismic response of a structure isolated with Quintuple friction pendulum bearing under FF, NF ground motion with directivity effect and fling step effect. Analyses result indicated that the NF ground excitations for a given earthquake event might differ significantly from FF ground excitations depending on the directivity impact and rupture pattern [28]. Yi et al. proposed a tie-down cable-spring restrainer (TCR) that was effective in NF and FF earthquake excitations. A design procedure is proposed for the application of TCR to a lead-rubber bearing structure. The analysis results show that the seismic isolation system was protected from excessive displacement under major earthquakes. In addition, the results of the analysis showed that structures with TCR exhibit less sensitivity to NF ground excitations [29]. Abbaszadeh et al. investigated the performance of friction dampers and LRB isolators under various earthquake loads. The structure used was subjected to three sets of NFs, with pulse, NF, and FF records. The analysis results showed that the hybrid control strategy was the most efficient technique for NF with pulse, NF, and FF records [30]. A mega-sub isolation system's seismic response to NF ground motions with velocity pulses were evaluated by Li et al. [31]. SAP2000 was used to carry out the finite element study of the mega-sub fixed and seismically isolated. Analysis findings indicated that NF ground excitations with velocity pulses had a detrimental effect on the mega substructure system's seismic responses.

In the presented study, it is aimed to determine how seismically isolated buildings behave under NF motions and ordinary FF motions. For this reason, the seismic response of a 7-storey building was investigated under NF and ordinary FF motions take into consideration above-mentioned literature survey and information. Three different ground motion characteristics of 1999 Düzce Earthquake were selected to evaluate the structural behavior. The behavior of the building supported by friction pendulum isolators with a displacement capacity of 48 cm was compared with the analysis results of fixed-base building.

II. THEORETICAL METHOD

2.1 Earthquake Motion

The effects of strong ground motions on the structures depend on variables such as the amplitude, duration, and frequency content of the ground motion, as well as the mass of the structure, the natural period, damping, and stiffness. In this manner, the fault zone might drastically affect structural behavior. The ground vibrations that take place within 20 km of the rupture are defined as NF ground motions [32-35]. The velocity pulse duration must be larger than 1.00 seconds. The ratio of the PGV to the PGA must be larger than 0.10 seconds [36]. The NF ground record motions have long-period pulses and permanent ground displacements which are not visible in recordings gathered in FF regions [37].

In this manner, ground motions can be categorized as having or not having a pulse signal in the near regions. Because it is simpler to recognize the pulse from the velocity waveforms, they are used to identify the pulse signals [38]. Velocity time series were given in Figure 1 for comparing the NF ground motion with and without a pulse signal.

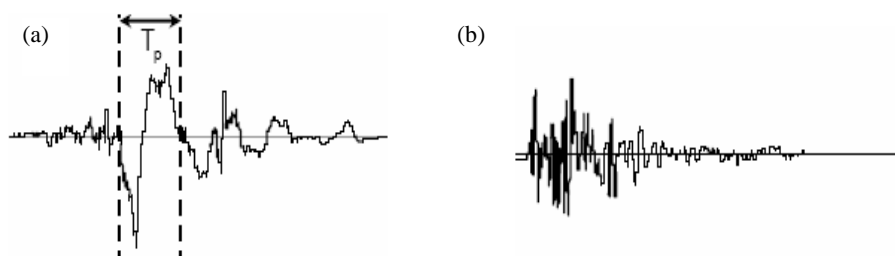


Figure 1. Velocity time series with a pulse (a) and without pulse (b) signals

Fundamentally, the important response parameters for the structures are the peak ground displacement (PGD), PGV, and PGA. The NF ground motions have a high PGV/PGA ratio, which significantly impacts their responses [39]. As long as the pulse amplitude and duration increase, the displacements and drift demands will increase. If NF ground motions compared to FF ground motions, the velocity-sensitive spectral region for NF recordings is substantially narrower, while the acceleration-sensitive and displacement-sensitive sections are much wider. For the same ductility, NF ground motions required a greater strength demand than FF ground motions. If the periods were normalized to the acceleration-sensitive region transition period, the response may become similar for the motions in both near and far regions [40].

In the present study, a seismically isolated building was subjected to two types of ground motion records, which are NF ground motion having different pulse durations and ordinary FF records. The period of the pulse (extracted pulse, T_p) is identified as the time needed to complete a full velocity cycle and is obtained in the velocity time history of the selected ground motions. Besides, every record set given in Table 1 which contained two types of NF and one type of FF earthquake motion.

Table 1. Dynamic characteristics of selected ground motions

<i>RSN</i>	<i>Motion Type</i>	<i>Event Name</i>	<i>Station</i>	<i>R_{rup}</i> (km)	<i>PGA</i> (cm/s ²)	<i>PGV</i> (cm/s)	<i>T_p</i> (sec)
1619	FF1	Duzce, Turkey (1999)	Mudurnu	34.3	90.25	13.28	-
1620	FF2	Duzce, Turkey (1999)	Sakarya	45.2	21.58	5.02	-
1605	NF1	Duzce, Turkey (1999)	Duzce	6.58	425.75	78.70	-
1615	NF2	Duzce, Turkey (1999)	Lamont 1062	9.14	203.07	14.63	-
1602	PLS1	Duzce, Turkey (1999)	Bolu	12.04	761.26	62.90	0.88
8164	PLS2	Duzce, Turkey (1999)	IRIGM 487	2.65	286.45	32.85	10.05

In addition, the original acceleration time history and velocity time history of selected motions are given in Figure 2 and Figure 3, respectively.

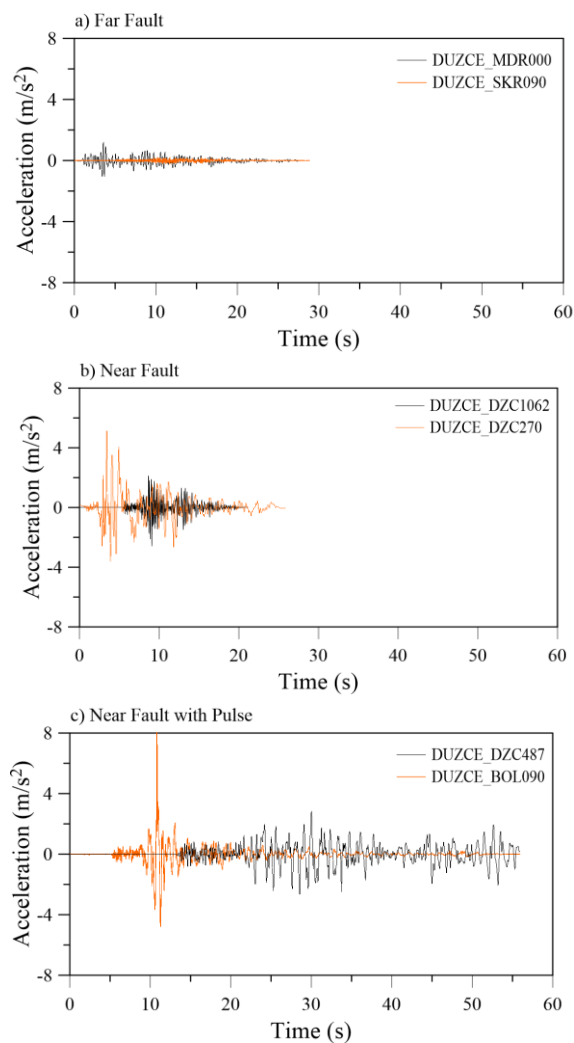


Figure 2. Acceleration time histories of the selected motions

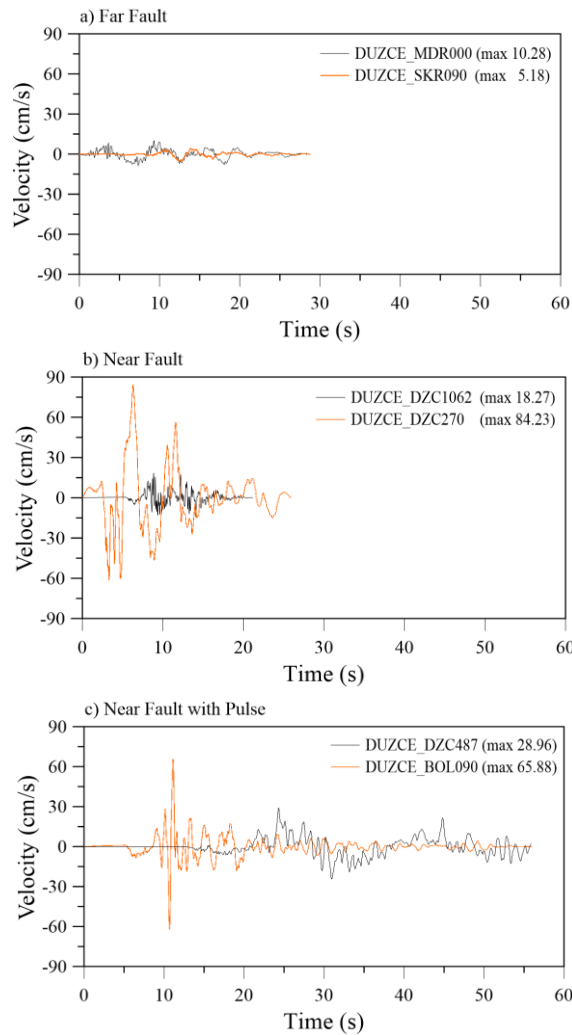


Figure 3. Velocity time histories of the selected motions

2.2 Seismic Isolation System

In this study, the building was isolated with friction pendulum bearing (FPB) system. Six different FPBs with a 48 cm displacement capacity were designed in the study. The building's overall weight was 72436 kN. The FPB was designed considering that the building is in a place with a ZC soil class according to TBEC-2018 [42] in Düzce, Turkey. An iteration is carried out to design the displacement of the FPB. The friction coefficient between sliding surfaces (μ_e) is 0.096, effective radius (R_e) is 4.5m, and yielding displacement (D_y) is 0.48m.

Effective stiffness, K_{eff} and estimated isolator displacement, D , are calculated by Eq. 1,

$$K_{eff} = \frac{P}{R_e} + \frac{\mu_e}{D} \tag{1}$$

where, P is the total weight of building. Effective damping coefficient (β_{eff}) of the FPBs is calculated by Eq. 2. The value of β_{eff} is limited to 30% (TBEC 2018).

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \frac{\mu_e}{\frac{D}{R_e} + \mu_e} \quad (2)$$

Damping scaling factor (η) is calculated by Eq. 3.

$$\eta = \frac{10}{5 + \beta_{eff}} \quad (3)$$

Period of the FPBS is calculated by Eq. 4.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P}{g \times K_{eff}}} \quad (4)$$

The spectral acceleration (S_a) is calculated by Eq. 5.

$$S_{a(g)} = \frac{S_{ae}}{\eta} \quad (5)$$

S_{ae} is the value corresponding to the period in the determined horizontal elastic earthquake spectrum. Spectral displacement (S_d) is calculated by Eq. 6.

$$S_d = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 S_{a(g)} \quad (6)$$

If the S_d is less than the estimated isolator displacement, the iteration is terminated. Effective stiffness of horizontal directions of FPBS for linear analysis is calculated by Eq. 7.

$$K_{effli} = \frac{P_i}{R_e} + \frac{\mu_e P_i}{D} \quad (7)$$

P_i is load supported by FPB ($i=1,2,\dots,6$). Effective stiffness of horizontal directions of FPBS for nonlinear analysis is calculated by Eq. 8.

$$K_{effnli} = \mu_e \frac{P_i}{D_y} \quad (8)$$

The design parameters of FPBS were given in Table 2.

Table 2. The design parameters of FPB

<i>Isolator Type</i>	μ_e	R_e	P_i (kN)	D_y (m)	D (m)	K_{effi} (kN/m)	β_{eff}	K_{effnli} (Nonlinear)
A	0,096	4,5	1450	0,00254	0,48	1172	0,3	54803
B	0,096	4,5	2087	0,00254	0,48	1687	0,3	78879
C	0,096	4,5	2116	0,00254	0,48	1710	0,3	79975
D	0,096	4,5	3067	0,00254	0,48	2479	0,3	115918
E	0,096	4,5	3110	0,00254	0,48	2514	0,3	117543
F	0,096	4,5	3155	0,00254	0,48	2550	0,3	119244

2.3 Structure Description and Modeling

A seven-story building was selected for dynamic analysis. The building to be analyzed is designed with a 1-5 axis in x-direction and A-F axis in y-direction. The axis distances in both directions of the building are 7 meters. Plan view and 3-D finite element model of the building are given in Figure 4 and Figure 5. A reinforced concrete frame system is used as the structural system. The slab plate was chosen as the slab type. Column with dimensions of 80x80 cm, beam with dimensions 40x70 cm, and floor slab with thickness 15 cm. The story height of the building is 400 cm. The live load of 5 kN/m² and dead load of 1 kN/m² according TSC [41]. The unit volume weight of reinforced concrete with 25 kN/m³ and the unit volume wall weight with 4 kN/m were selected.

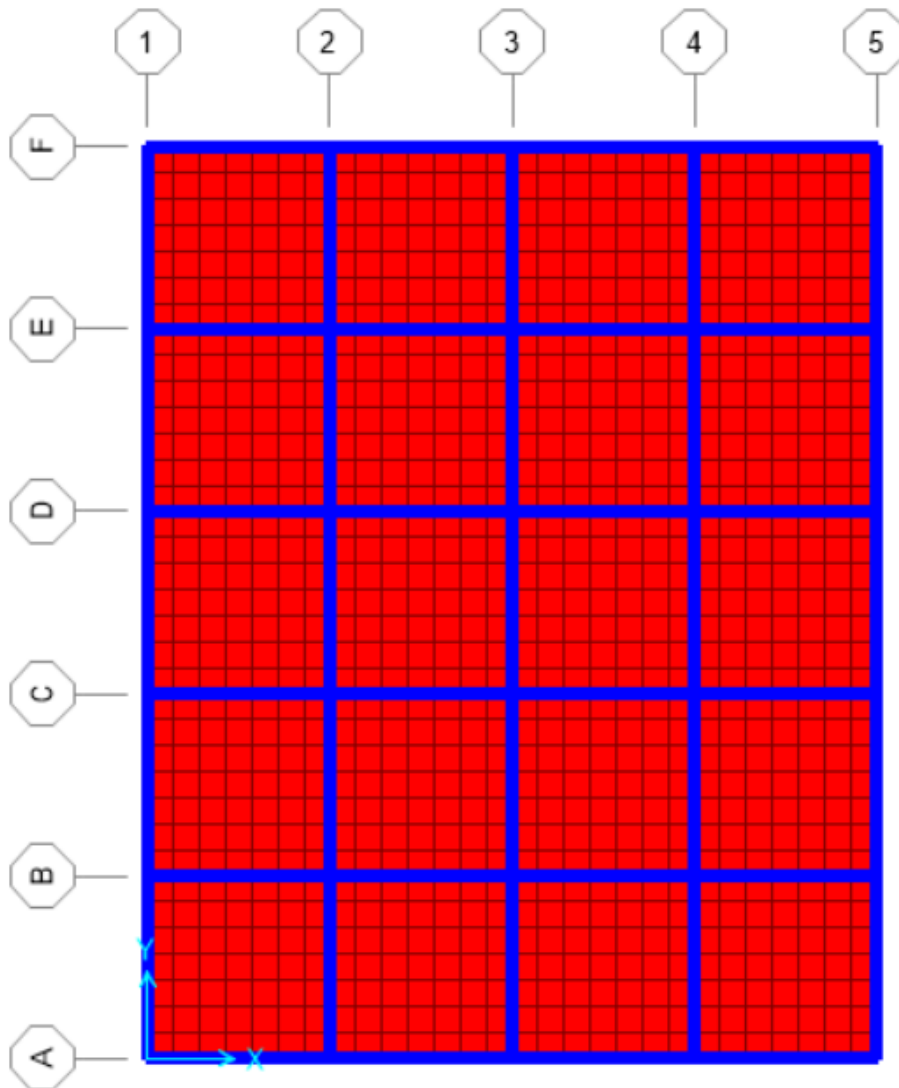


Figure 4. Plan view of the building

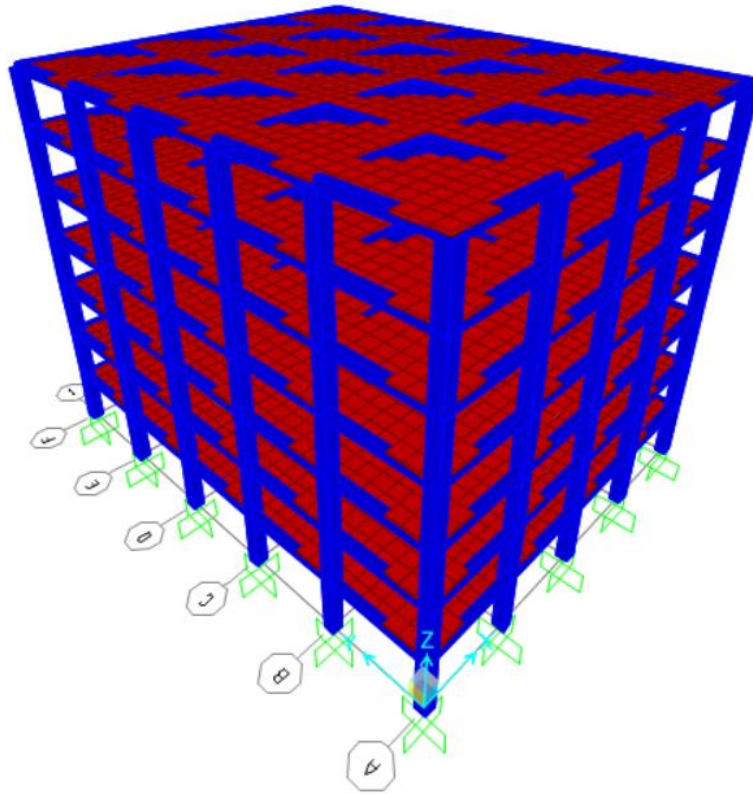


Figure 5. 3-D finite element model of the building

The first three mode shapes obtained from numerical modal analysis of the building are presented in Figure 6. As shown in Figure 6, the first two modes are translational modes along with the two main directions of the building. The first mode is translational in the X direction while the second one is translational in the Y direction. The third mode is a torsional mode for building.

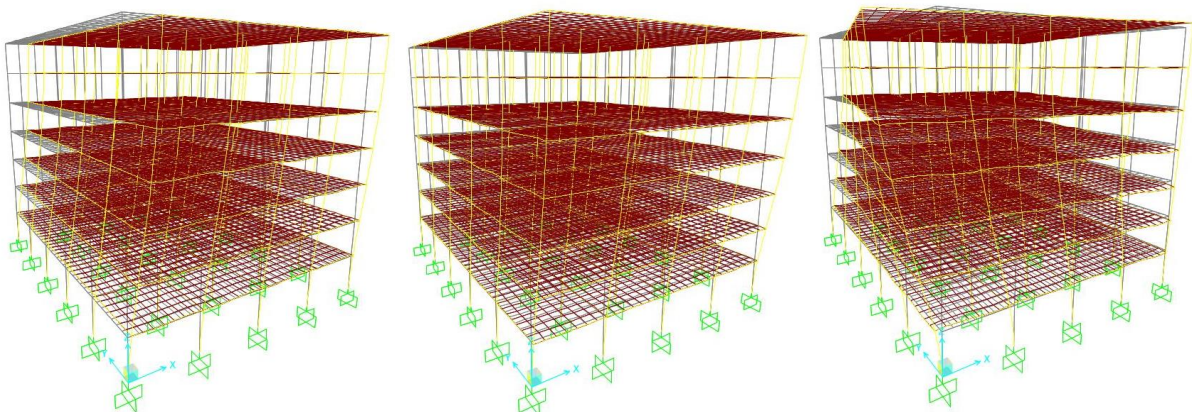


Figure 6. The first three numerical mode shapes of the building

The modal analyses were carried out considering the first 15 modes to check the effect of modal masses. The periods of first three vibration mode were given in Table 3.

Table 3. The periods depend on the mode shapes of the considered models

Models	Fundamental Period (s)		
	1 st Mode	2 nd Mode	3 rd Mode
Fixed base	0.9898	0.9749	0.8656
Isolated base	2.5457	2.4248	0.4850

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

The earthquake analysis of the building was performed to investigate the near and FF effects on the seismically isolated buildings. The relationship between the lateral displacements of the first floor x-direction under earthquake motions is given as time history in Figure 7.

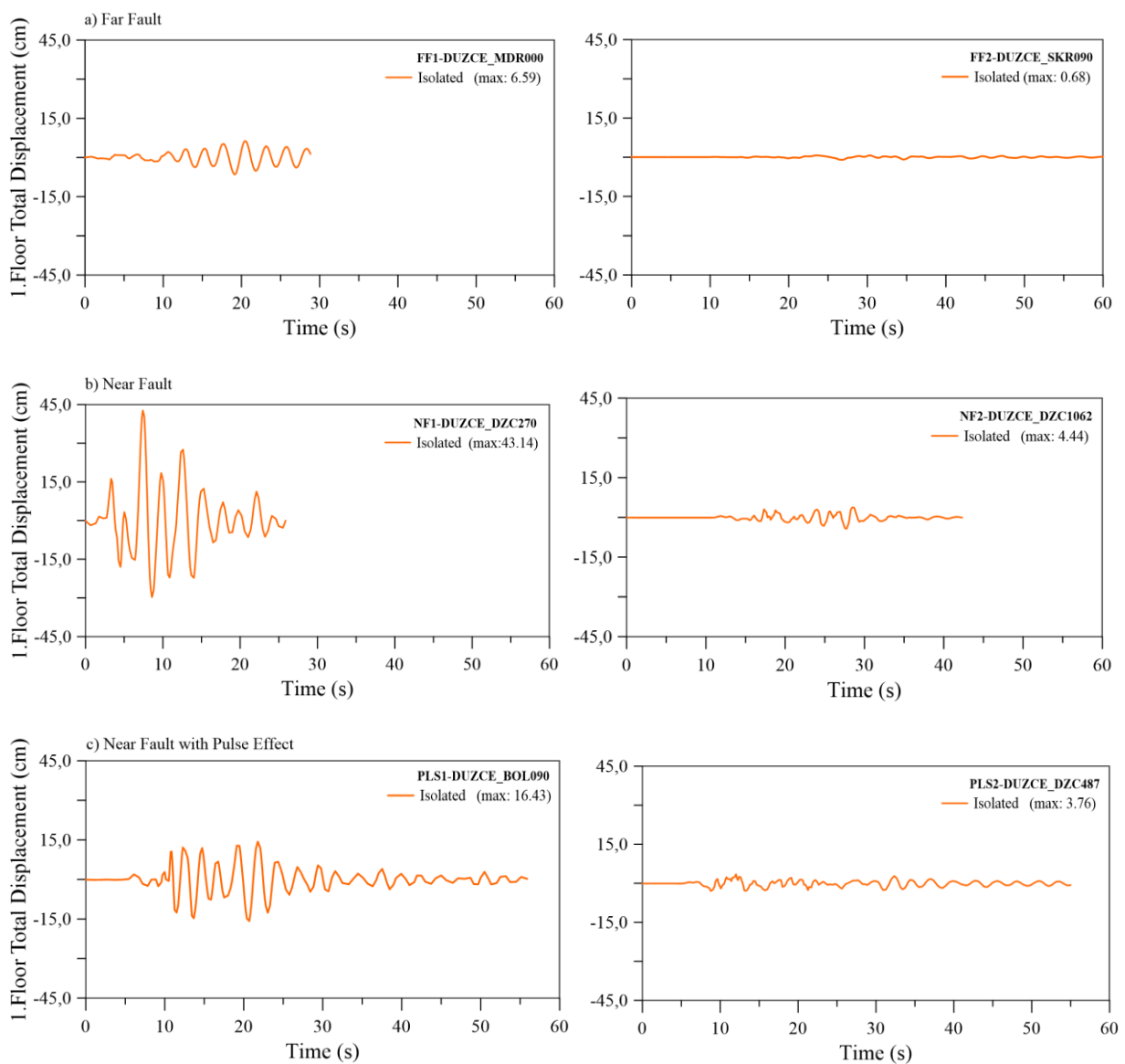


Figure 7. Total displacement-time history of first floor with isolated base

As mentioned above, the total displacement capacity of the isolators was calculated as 48 cm. The displacements obtained from the seismically isolated building subjected to FF1 ground motion was 6.59 cm and FF2 ground motion was 0.68 cm at the 1st floor, respectively. The 1st floor displacements subjected to NF1 ground motion was 43.14 cm and NF2 ground motion was 4.44 cm, respectively. The 1st floor displacements of the building subjected to PLS1 was 16.43 cm and PLS2 was 3.76 cm, respectively. Although the ground motion recorded at Bolu Station has a large PGA and pulse content, large displacement was obtained from Düzce Station.

The fourth-floor displacements on x-direction under considered earthquake motions were given as a time history in Figure 8. The displacements obtained from the seismically isolated building subjected to FF1 ground motion was 7.44 cm and FF2 ground motion was 0.77 cm at the 4th floor, respectively. The 4th floor displacements subjected to NF1 ground motion was 48.72 cm and NF2 ground motion was 5.01 cm, respectively. The 4th floor displacements of the building subjected to PLS1 was 18.51 cm and PLS2 was 4.07 cm, respectively.

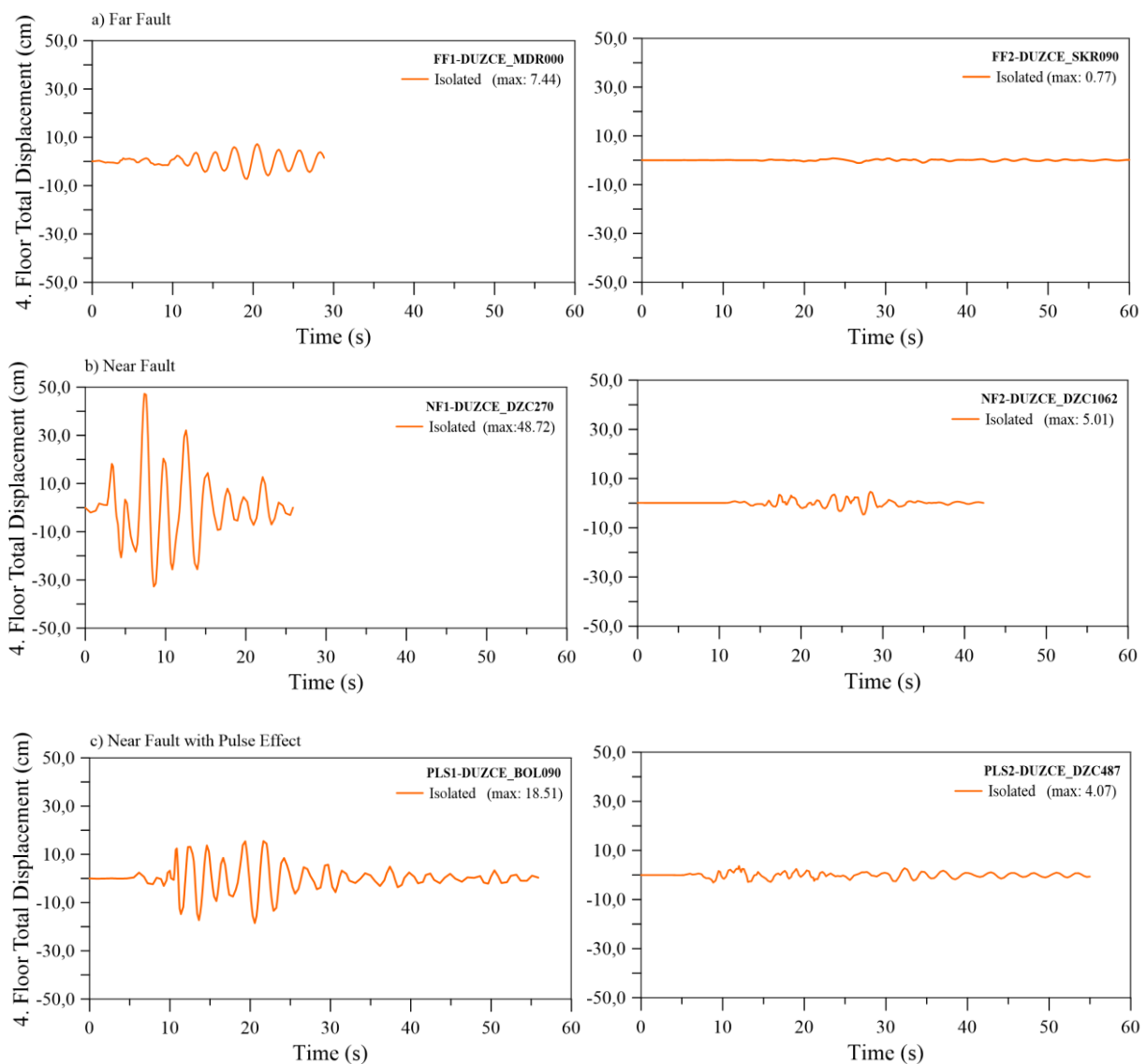


Figure 8. Total displacement-time history of fourth floor with isolated base

The displacement time history for the seventh floor on x-direction were given in Figure 9 for considered earthquake motions. The displacements obtained from the seismically isolated building subjected to FF1 ground motion was 7.84 cm and FF2 ground motion was 1.26 cm at the 7th floor, respectively. The 7th floor displacements subjected to NF1 ground motion was 51.40 cm and NF2 ground motion was 5.27 cm, respectively. The 7th floor displacements of the building subjected to PLS1 was 19.49 cm and PLS2 was 4.09 cm, respectively.

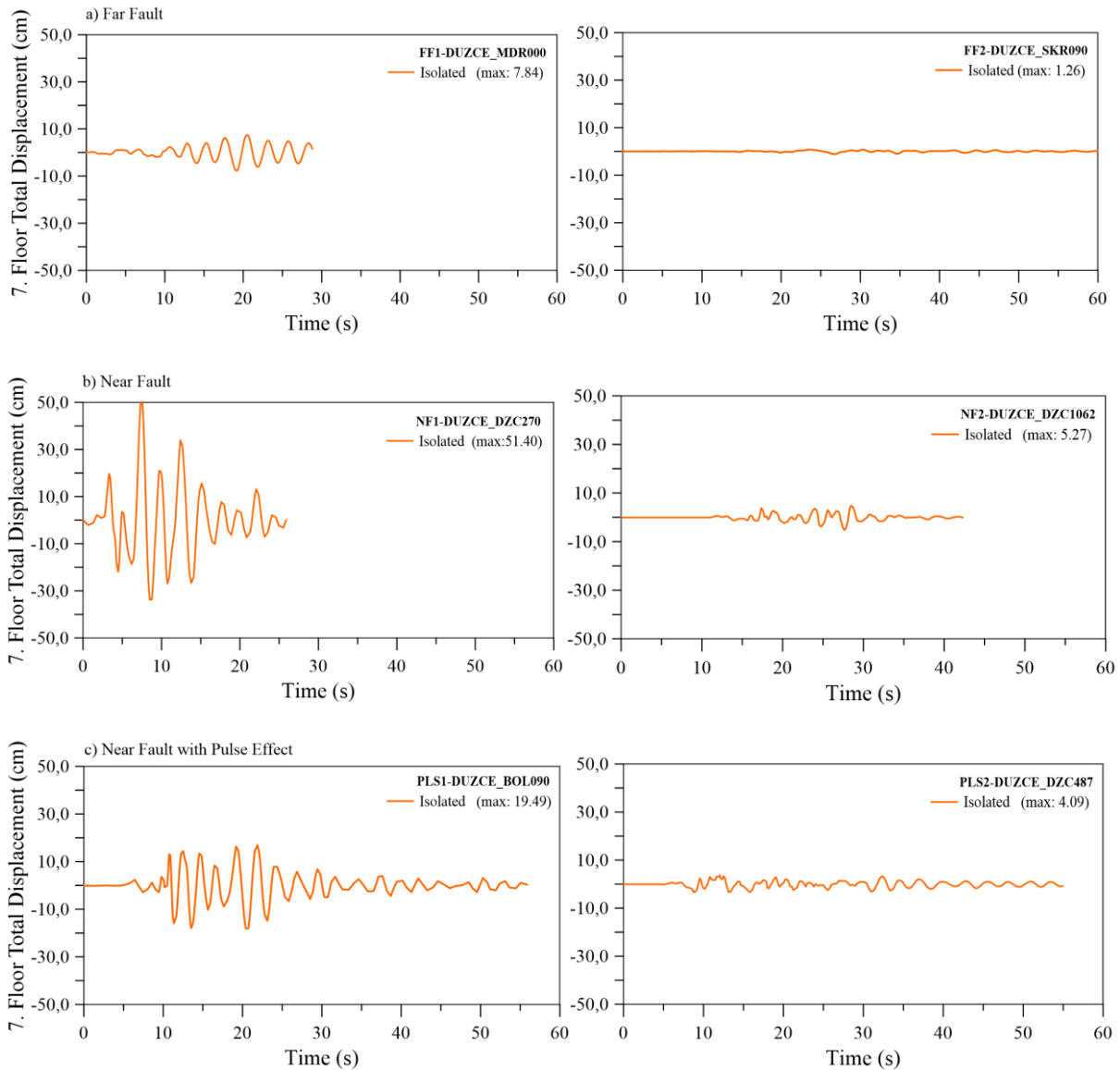


Figure 9. Total displacement-time history of seventh floor with isolated base

Relative floor displacements were obtained by subtracting the total storey displacement values from the building base displacement. The base displacements were equal to isolator displacement for the isolated building. The relative storey displacements at 1st floor were given in Figure 10. The 1st floor displacement under FF1 ground motion for the fixed and isolated building were 0.28 cm and 0.18 cm, respectively. The displacement under FF2 ground motion for the fixed and isolated building were 0.08 cm and 0.03 cm, respectively. The 1st floor displacement under NF1 ground motion for the fixed and isolated building were 2.73 cm and 1.21 cm, respectively. The displacement under NF2 ground motion for the fixed and isolated building were 0.67 cm and 0.12 cm,

respectively. The displacement under PLS1 ground motion for the fixed and isolated building were 4.09 cm and 0.40 cm, respectively. In addition, the displacement under PLS2 ground motion for the fixed and isolated building were 0.89 cm and 0.10 cm, respectively.

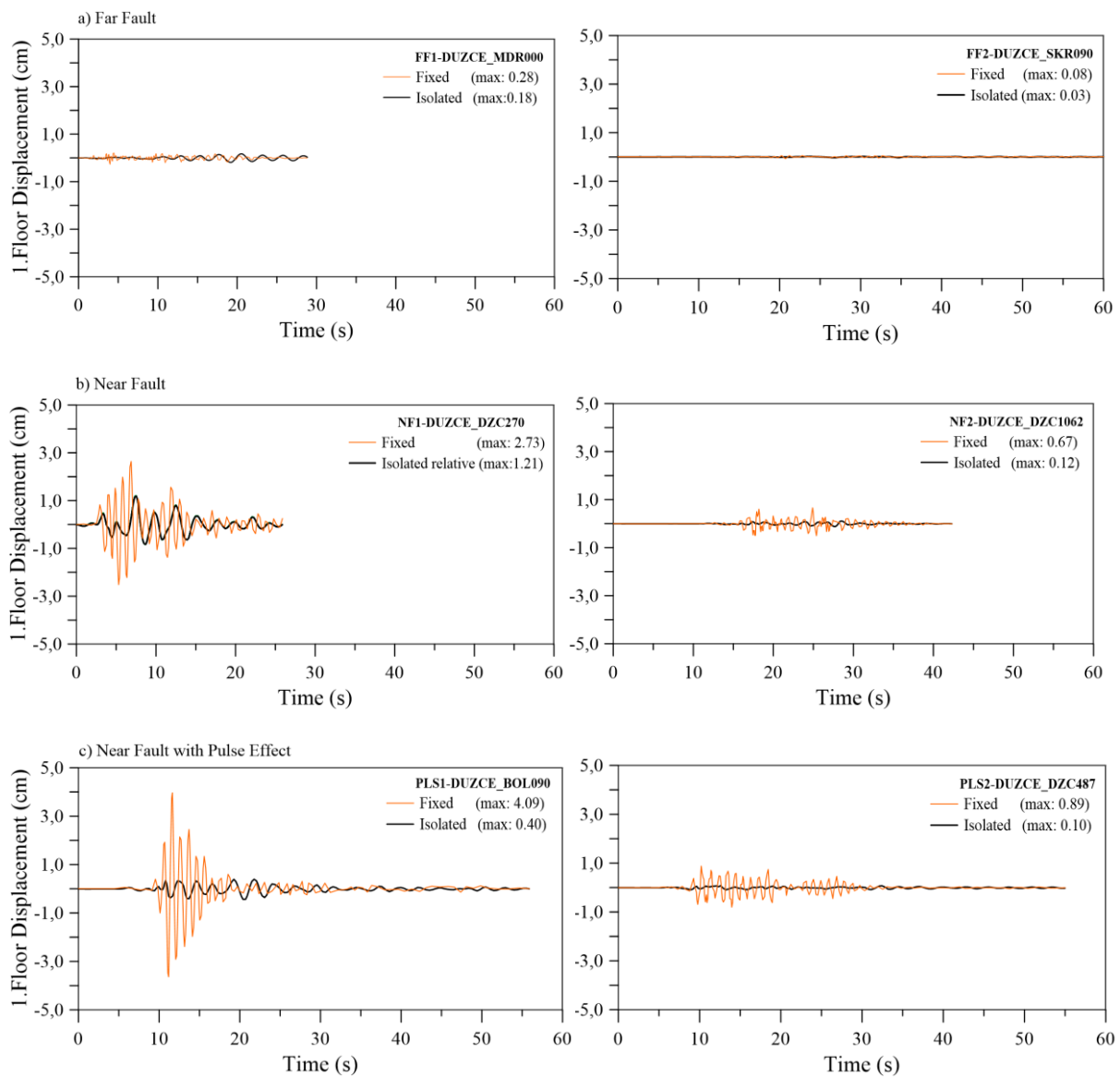


Figure 10. Relative displacement-time history of first floor

Relative displacement of fourth floor were given in Figure 11. The displacements were 1.23 cm and 1.00 cm for fixed-base and isolated buildings under FF1 ground motion, respectively. The displacements were obtained as 0.39 cm and 0.17 cm for fixed-base and isolated buildings under FF2 record motion, respectively. For the NF1 and NF2 motions, fourth floor displacements were obtained as 16.84 cm-6.80 cm and 3.73 cm-0.76 cm for the fixed base and isolated base, respectively. If considered the pulse-type ground motion, PLS1 caused to 25.01 cm displacement for fixed-base building and 2.54 cm displacement for isolated building. In addition, the displacements were obtained as 5.24 cm for fixed-base and 0.66 cm for isolated under the PLS2 motion.

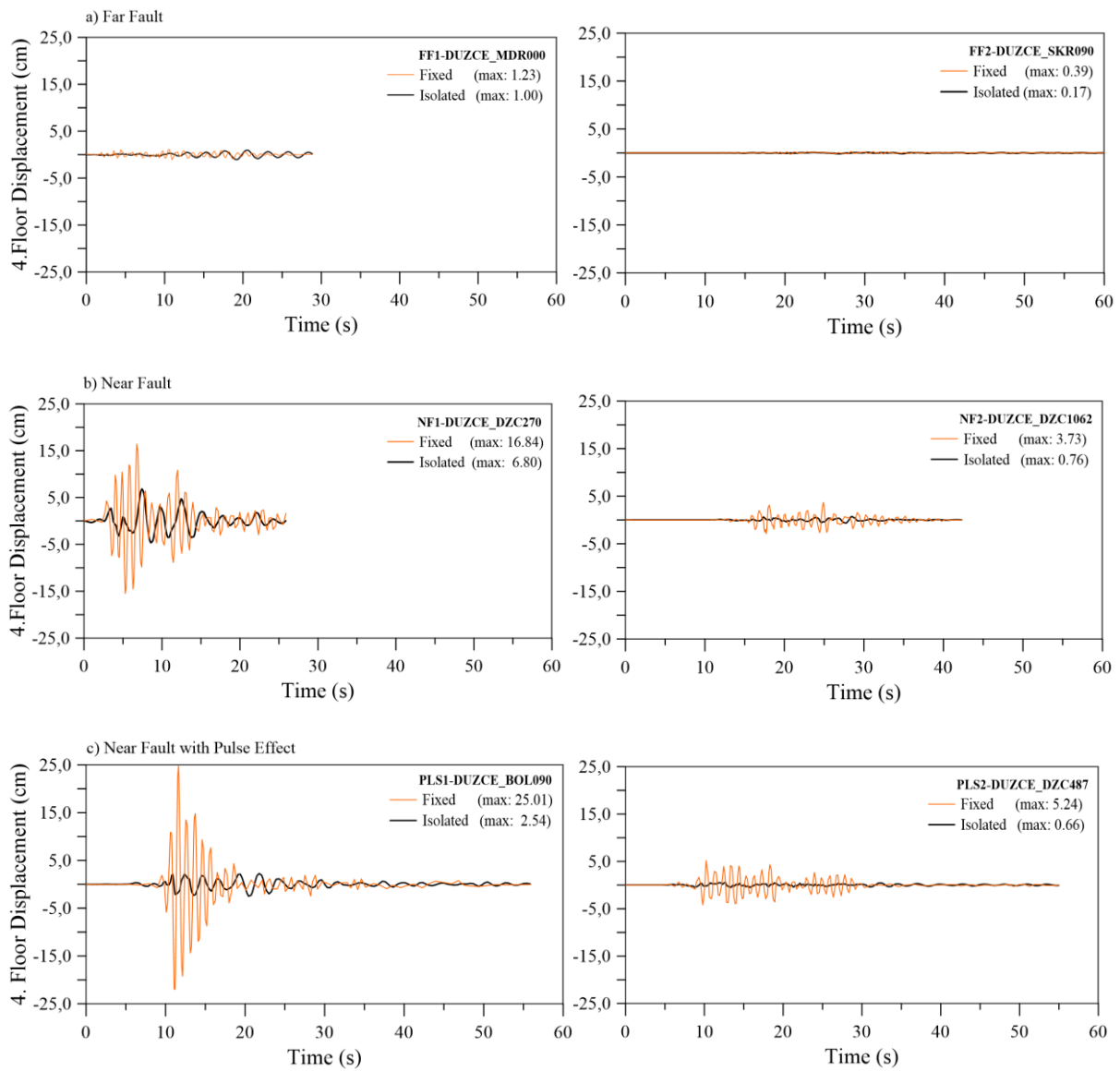


Figure 11. Relative displacement-time history of fourth floor

As seen Figure 12, the maximum displacements of seventh floor were 1.89 cm and 1.39 cm for fixed-base and isolated buildings for FF1 ground motion, respectively. The maximum displacements were obtained as 0.49 cm and 0.24 cm for fixed-base and isolated buildings under FF2 record motion, respectively. Seventh floor displacements were 24.39 cm-9.51 cm and 6.63 cm-1.13 cm for the NF1 and NF2 motions, respectively. If considered pulse-type ground motion, PLS1 caused to 36.13 cm at seventh floor level in fixed-base building and 3.55 cm displacement for isolated building. In addition, the seventh floors of fixed-base and isolated building displaced as 8.04 cm and 1.11 cm under the PLS2 motion, respectively.

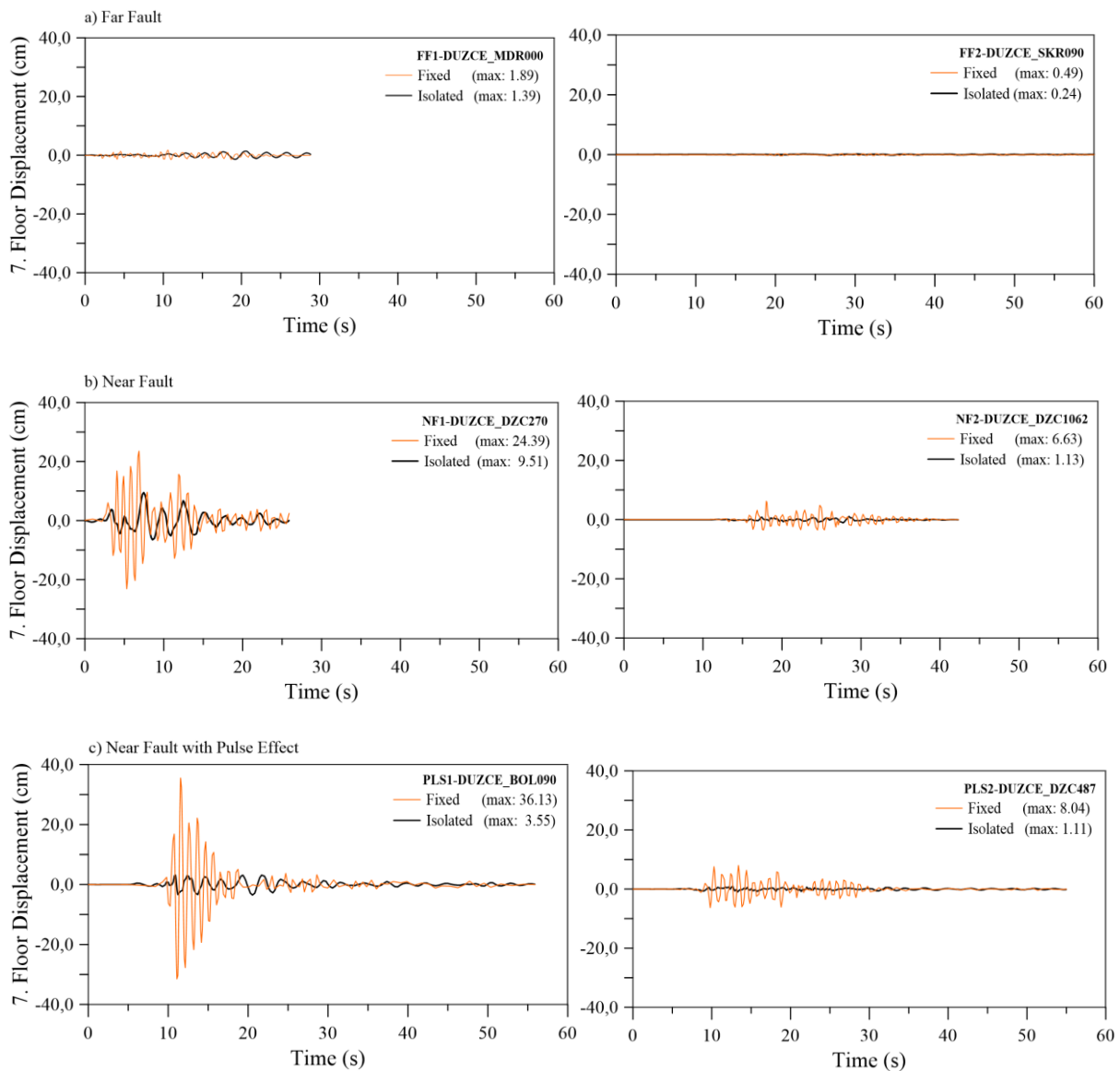


Figure 12. Relative displacement-time history of seventh floor

IV. CONCLUSIONS

One of the most important solutions developed to increase the earthquake performance of the buildings within the earthquake fault zone is using of the base isolator with high damping capacity between the building and the foundation. In order to reduce the earthquake loads acting on the buildings, base isolators have been frequently used especially in high-rise buildings for many years. Although structural demands decrease in the seismically isolated buildings, the structural behavior of the isolated buildings under different earthquake characteristics should be well known. In this study, the dynamic behavior of the seven-storey isolated building was investigated for NF and FF ground motions. Dynamic analysis was performed with SAP 2000 finite element analysis software. For evaluation of the structural behavior, three different earthquake ground motion characteristics were selected. 1999 Düzce Earthquake was chosen as main ground motion. Mudurnu and Sakarya station records of 1999 Düzce Earthquake were selected for FF ground motion. Düzce and Lamont 1062 station records of 1999 Düzce

Earthquake were considered NF record motion. As a pulse-type record motion, 1999 Düzce Earthquake Bolu and IRIGM 487 station records were selected. The structural behavior of the building supported by friction pendulum isolators with a displacement capacity of 48 cm was compared with the analysis results of fixed-base building. The following results were obtained in the study:

- Although the PGA is the most effective parameter for all buildings, isolated buildings were mostly affected under PGA of record motion compared to fixed-base buildings for FF earthquakes and non-pulse-like NF earthquakes.
- If the isolated building is subjected to pulse-like NF ground motion, the isolated building will have less structural demand depending on the vibration mode period.
- Fixed-base buildings have high structural demand both the PGA of ground motion and pulse effect.
- The distance of an earthquake ground motion from the structure is not the only dominant parameter for the structural behavior.
- The seismic isolation or damping mechanisms are a great valuable solution for the buildings under pulse effect of the strong ground motion.

In the light of the results, the seismically isolated buildings should be investigated under the pulse duration of the ground motions in the future studies considering the nonlinearity and utilization of other damping mechanisms. High mode effects and pulse period effects should be evaluated for the seismically isolated buildings.

REFERENCES

- [1] Yang D, Pan J, Li G (2010) Interstory drift ratio of building structures subjected to near-fault ground motions based on generalized drift spectral analysis. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 30:1182–1197. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.04.026>
- [2] Somerville PG (2003) Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse. *Phys. earth Planet Inter.* 137:201–212. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(03\)00015-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(03)00015-3)
- [3] Zou D, Han H, Liu J, Yang D, Kong X (2017) Seismic failure analysis for a high concrete face rockfill dam subjected to near-fault pulse-like ground motions. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 98:235–243. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.031>
- [4] Mahmoud S, Alqarni A, Saliba J, Ibrahim AH, Diab H (2021) Influence of floor system on seismic behavior of RC buildings to forward directivity and fling-step in the near-fault region. *Structures* 30:803–817. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.052>
- [5] Alavi B, Krawinkler H (2000) Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering.*
- [6] Alavi B, Krawinkler H (2001). *Effects of near-fault ground motions on frame structures.* John A. Blume Earthquake Engineering Center Stanford.
- [7] Liao W-I, Loh C-H, Lee B-H (2004) Comparison of dynamic response of isolated and non-isolated continuous girder bridges subjected to near-fault ground motions. *Eng. Struct.* 26:2173–2183. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.07.016>

- [8] Yılmaz D, Soyuluk K (2019) Comparative analysis of steel arch bridges under near-fault ground motion effects of directivity-pulse and fling-step. *J. Struct. Eng.* 2:63–74, 2019. <https://doi.org/10.31462/jseam.2019.02063074>
- [9] Bertero VV, Mahin SA, Herrera RA (1978) “Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 6:31–42. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290060105>
- [10] Anderson JC, Bertero VV (1987) Uncertainties in establishing design earthquakes. *J. Struct. Eng.* 113:1709–1724. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1987\)113:8\(1709\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1987)113:8(1709))
- [11] Hall JF, Heaton TH, Halling MW, Wald DJ (1995) Near-source ground motion and its effects on flexible buildings. *Earthq. spectra* 11:569–605. <https://doi.org/10.1193/1.1585828>
- [12] Malhotra PK (1999) Response of buildings to near-field pulse-like ground motions. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 28:1309–1326. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199911\)28:11<1309::AID-EQE868>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199911)28:11<1309::AID-EQE868>3.0.CO;2-U)
- [13] Alavi B, Krawinkler H (2000) Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design. *Proceedings of the 12th World Conference of Earthquake Engineering, New Zealand, Paper No. 2665.*
- [14] Alavi B, Krawinkler H (2004) Strengthening of moment-resisting frame structures against near-fault ground motion effects. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 33:707–722. <https://doi.org/10.1002/eqe.370>
- [15] Kalkan E, Kunnath SK (2006) Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings. *Earthq. spectra* 22:367–390. <https://doi.org/10.1193/1.2192560>
- [16] Mortezaei A, Ronagh HR, Kheyroddin A (2010) Seismic evaluation of FRP strengthened RC buildings subjected to near-fault ground motions having fling step. *Compos. Struct.* 92:1200-1211. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.017>
- [17] Sehhati R, Rodriguez-Marek A, ElGawady M, Cofer WF (2011) Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures. *Eng. Struct.* 33:767–779. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.032>
- [18] Soleimani Amiri F, Ghodrati Amiri G, Razeghi H (2013) Estimation of seismic demands of steel frames subjected to near-fault earthquakes having forward directivity and comparing with pushover analysis results. *Struct. Des. Tall Spec. Build.* 22:975–988. <https://doi.org/10.1002/tal.747>
- [19] Moniri H (2017) Evaluation of seismic performance of reinforced concrete (RC) buildings under near-field earthquakes. *Int. J. Adv. Struct. Eng.* 9:13–25, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40091-016-0145-6>
- [20] Hamidi H, Karbassi A, Lestuzzi P (2020) Seismic response of RC buildings subjected to fling-step in the near-fault region. *Struct. Concr.* 21:1919-1937. <https://doi.org/10.1002/suco.201900028>
- [21] Abd-Elhamed A, Mahmoud S (2019) Simulation analysis of TMD controlled building subjected to far- and near-fault records considering soil-structure interaction. *J. Build. Eng.* 26:100930. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100930>
- [22] Güneş N, Ulucan ZÇ (2019) Nonlinear dynamic response of a tall building to near-fault pulse-like ground motions. *Bull. Earthq. Eng.* 17:2989-3013. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00570-y>
- [23] Bilgin H, Hysenlliu M (2020) Comparison of near and far-fault ground motion effects on low and mid-rise masonry buildings. *J. Build. Eng.* 30:101248. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101248>
- [24] Mahmoud S, Alqarni A, Saliba J, Ibrahim AH, Genidy M, Diab H (2021) Influence of floor system on seismic behavior of RC buildings to forward directivity and fling-step in the near-fault region. *Struct.* 30:803–817. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.052>

- [25] Mashhadi S, Asadi A, Homaei F, Tajammolian H (2021) Seismic response of mid-rise steel MRFs: the role of geometrical irregularity, frequency components of near-fault records, and soil-structure interaction. *Bull. Earthq. Eng.* 19:3571–3595. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01103-2>
- [26] Quaranta G, Mollaioli F (2018) On the use of the equivalent linearization for bilinear oscillators under pulse-like ground motion. *Eng. Struct.* 160:395-407. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.055>
- [27] Wang H, Zheng W, Li J, Gao Y (2019) Effects of temperature and lead core heating on response of seismically isolated bridges under near-fault excitations. *Adv. Struct. Eng.* 22:2966-2981. <https://doi.org/10.1177/1369433219855914>
- [28] Sodha A, Sandeep V, Soni D (2020) Seismic Response of Structure Isolated with Quintuple Friction Pendulum Bearing Under Directivity Focusing Earthquakes. *Adv. in Comput. Methods and Geomec.* 629-637. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0886-8_51
- [29] Yi J; Li J, Tsang H (2021) Tie-down cable-spring restrainers for seismic protection of isolated bridges. *Struct.* 33:4371-4384. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.019>
- [30] Abbaszadeh MA, Hamidi H, Amiri JV (2022) On seismic response reduction of adjacent frame: emphasis on the different characteristics of earthquakes. *Int. J. Civ. Eng.* 20:91-106. <https://doi.org/10.1007/s40999-021-00655-3>
- [31] Li X, Tan P, Wang Y, Zhang Y, Li X, He Q, Zhou F (2022) Shaking table test and numerical simulation on a mega-sub isolation system under near-fault ground motions with velocity pulses. *Int. J. Struct. Stab. Dyn.* 22: 2250026. <https://doi.org/10.1142/S0219455422500262>
- [32] Mahmoud S, Alqarni A, Saliba J, Ibrahim AH, Diab H. (2021) Influence of floor system on seismic behavior of RC buildings to forward directivity and fling-step in the near-fault region. *Struct.* 30:803-817. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.052>
- [33] Somerville PG (2003) Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse. *Phys. Earth Planet. Inter.* 137:201-212. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(03\)00015-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(03)00015-3)
- [34] Yang D, Pan J, Li G (2010) Interstory drift ratio of building structures subjected to near-fault ground motions based on generalized drift spectral analysis. *Soil Dyn. Earthquake Eng.* 30:1182-1197. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.04.026>
- [35] Zou D, Han H, Liu J, Yang D, Kong X (2017) Seismic failure analysis for a high concrete face rockfill dam subjected to near-fault pulse-like ground motions. *Soil Dyn. Earthquake Eng.* 98:235-243. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.031>
- [36] Liao WI, Loh CH, Lee BH (2004) Comparison of dynamic response of isolated and non-isolated continuous girder bridges subjected to near-fault ground motions. *Eng. Struct.* 26:2173-2183. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.07.016>
- [37] Alavi B, Krawinkler H (2001) Effects of near-fault ground motions on frame structures, John A. Blume Earthquake Engineering Center Stanford.
- [38] Akkar S, Yazgan U, Gülkan P (2005) Drift estimates in frame buildings subjected to near-fault ground motions. *J. Struct. Eng.* 131:1014-1024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:7\(1014\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:7(1014))
- [39] Malhotra PK (1999) Response of buildings to near-field pulse-like ground motions. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* 28:1309-1326. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199911\)28:11<1309::AID-EQE868>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199911)28:11<1309::AID-EQE868>3.0.CO;2-U)

- [40] Chopra AK, Chintanapakdee C (2001) Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* 30:1769-1789. <https://doi.org/10.1002/eqe.92>
- [41] Design loads for buildings (1997). Turkish Standard Code 498, Turkey
- [42] TBEC (2018). Turkish building earthquake code, Ministry of Environment and Urbanization of Turkey, Ankara, Turkey



Original Paper

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

journal homepage: <https://jiens.org>

Investigation Friction Loss of Concrete Pavement Surface with a New Method

Orhan Karpuz^{a,*}, Muhammet Vefa Akpınar^b, Hakan Aslan^{c,*}, Muhammet Çelik^{d,*}, Elif Çiçek^e

^aCivil Engineering Free Technical Office, Civil Engineer, Gümüşhane, 29010, Turkey.

^bDepartment of Civil Engineering, The Faculty of Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon, 61080, Turkey.

^cDepartment of Civil Engineering, The Faculty of Engineering, Sakarya University, Sakarya, 54187, Turkey.

^dDepartment of Civil Engineering, The Faculty of Engineering, Yalova University, Yalova, 77200, Turkey.

^eDepartment of Civil Engineering, The Faculty of Engineering, Hacettepe University, Ankara, 06800, Turkey.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 05 June 2022

Received in revised form 14 June 2022

Accepted 20 July 2022

Available online

Keywords:

Concrete Pavement

Fine Aggregate

Abrasion Resistance

Finessness Modulus

Polishing

Friction Coefficient

Friction Loss

ABSTRACT

In this study, the effect of abrasion resistance and fineness modulus of the fine aggregates in the concrete mixture was investigated to determine the friction coefficient loss. Nine concrete mixtures samples were obtained by using three different gradations and fine aggregates with three different Los Angeles (LA) wear resistance. A new accelerated polishing test method was conducted in a laboratory. In the new method, unlike other wheel polishing methods, a constant horizontal friction force was formed alongside the vertical pressure of the wheel contact area. The wet friction coefficients of the concrete surfaces were measured by the British Friction Pendulum. Test results showed that the most friction loss occurred in the fine aggregated concrete mixtures obtained from limestone with the lowest wear resistance, while the least loss values were obtained for basalt with high abrasion resistance.

2022 JIENS All rights reserved.

I. INTRODUCTION

Maintaining sufficient coarse texture and providing resistance to polishing is essential for ensuring adequate slip resistance on road surfaces. Macro texture, which is provided by coarse aggregate grains or tinning, increases friction by creating gaps that allow water to escape water from the contact interface between the surface and tires of vehicles traveling at high speeds in wet weather conditions. On the other hand, micro textures of aggregates or concrete surfaces are very critical for providing a dry contact area between the wheel and the road surface by breaking up the final water film remaining in the contact interface in all speed situations [1]. Increasing resistance to polishing depends on the magnitude of the resistance to abrasion of these small protrusions or the formation of new protrusions by harder parts because of the abrasion of less rigid parts [2]. Since the polished surfaces are prone to slip problems, the friction coefficient value of the pavement surface decreases significantly especially during rainy weather conditions [3-4]. As the polished road gets wet, the braking distances of vehicles can be quite prolonged. The speed of polishing is directly related to traffic density. Especially, heavy tonnage vehicles can play a significant role in polishing due to their large vertical and horizontal forces. Therefore, the resistance of the road surface materials to polishing is much more important where commercial vehicle traffic is high and in the road sections where vehicles move with great accelerations [5].

*Corresponding author. Tel.: +90- 226 815 6365 0 E-mail: muhammed.celik@yalova.edu.tr

Fine aggregates (0-4 mm) in a concrete structure can play a significant role to connect the coarse aggregates by helping cement material and they can also provide impermeability via filling the gaps. Fine aggregate properties in the mixture directly affect the friction coefficient of the surface for concrete roads [6-8]. Shape, fineness modulus, amount, and mineralogical structure of fine aggregates have a significant effect on the surface properties of the concrete road. Usually, limestone is used in concretes as a mineral material. However, limestone is composed of calcite minerals that have a high tendency to polish, therefore, it is important to determine the effects of using fine aggregates with hard mineral content instead of limestone for the surface properties of concrete roads. There are, however, limited accepted laboratory test methods in the literature to determine the effects of the wheels on the polishing of the concrete surface. One of the methods is the Polished Stone Value (PSV) method developed for aggregates by Transport Research Laboratory (TRL) in the 1950s [9]. In this method, only vertical pressure is used on the contact surface. However, in the real environment, the vehicle wheel applies horizontal friction forces to the protrusions on the road surface as well as vertical pressure. Therefore, in this research study, some new design techniques have been introduced and new test equipment issued for the tests [10]. In this way, the rubber wheel, freely rotating on the standard PSV test machine, has been redesigned to rotate with constant partial braking without locking. Vertical weight is increased, and then a new test drum and new sample molds in the same diameters are manufactured. In the tests, while fine aggregate properties in concretes are changed, other material properties in the concrete remain the same. Test results showed that the most friction loss occurred in the fine aggregated concrete mixtures obtained from limestone with the lowest wear resistance, while the least loss values were obtained for basalt with high abrasion resistance.

II. EXPERIMENTAL METHOD / TEORETICAL METHOD

2.1 Materials

CEM I 42.5N was used in the concrete mixtures for this study. The cement properties are given in Table 1. As seen, limestone is used as coarse aggregate and limestone, 50% of limestone+ 50% of basalt, and basalt is used as fine aggregates. The properties of materials determined by the gravity and Los Angeles tests are provided in Table 2. The maximum limit of the Los Angeles abrasion percentage of wear layer aggregate of a road is suggested as 30% by the General Directorate of Highways of Turkey in Road Technical Specification [11]. The wear resistance of the aggregates used in the tests was defined within the specification limits [12]. The gradations of the aggregates used in the mixtures are shown in Table 3. As seen, the aggregate materials contain 57% coarse aggregates, and 43% fine in volume.

Table 1. Physical and chemical properties of normal portland cement (CEM I 42.5N)

<u>Physical and mechanical properties</u>		<u>Chemical Analysis</u>	
			(%)
Specific gravity (g/cm ³)	3.15	SiO ₂	20.06
Specific surface (cm ² /g)	3410.0	Al ₂ O ₃	5.16
Retained by 200 microns in the sieve (%)	3.1	Fe ₂ O ₃	3.16
Compressive strength (MPa), 2 days	24.5	CaO	62.43
Compressive strength (MPa), 7 days	42.0	MgO	2.82
Compressive strength (MPa), 28 days	44.4	SO ₃	2.32
		K ₂ O	0.6
		TiO ₂	0.2
		NaO ₂	0.36
		Sulfur	0.17
		Chlorine	0.04
		Ignition loss	1.55
		Insoluble residue	1.05

Table 2. Properties of coarse and fine aggregate

Characteristics	Standards	Limestone		%50 Limestone + %50 Basalt	Basalt
		Course	Fine	Fine	Fine
Dry Unit Weight, (gr/cm ³)	ASTM C-127	2.70	2.57	2.69	2.98
Saturated Unit Weight, (gr/cm ³)	ASTM C-128	2.72	2.63	2.75	3.02
Natural Unit Weight, (gr/cm ³)	ASTM C-127	2.702	2.58	2.72	3.01
Water Absorption, (%)	ASTM C-131	0.74	2.33	2.06	1.45
Water Content, (%)		0.1	0.4	1.20	1.03
Abrasion Ratio, (%) (Los Angeles)		28.5	33.1	27.8	21.3

Table 3. Gradations of aggregates used in the mixtures

Sieve size(mm)	Aggregate Types Passing (%)		
	A	B	C
16	100	100	100
8	73	73	73
4	41.7	41.7	41.7
2	31.27	27.10	20.85
1	22.93	16.68	8.34
0.5	14.60	8.34	4.17
0.25	6.25	2.09	2.09
Pan	0	0	0
Fineness modulus of finer aggregate	2.2	2.7	3.15

The concrete samples used for the accelerated polishing tests had a thickness of 100 mm in the radial direction. The roll sanding paper with an average macro roughness (texture) of 0.8 mm, which is determined by the sand patch method [13], was glued into a continuous strip on the inner surfaces of the molds to roughen the concrete specimen surfaces. After removing the mold the appearance of the rough surface of the concrete sample showed that the surface had cement mortar that contained more fine aggregate grains than the coarse aggregate.

2.2 Accelerated Polishing Test Method

A new test design model was prepared for this study [10] (Fig. 1 (A)). Illustrates the test machine developed for accelerated polishing. In this new design, the rubber wheel that makes the polishing can be rotated with adjustable partial braking without blocking. It is an electric motor that provides movement of the test machine. Firstly, the motor rotates the drum on which concrete samples are placed and then the rubber wheel with a 200 mm (8-inch) diameter, which presses on the circular surface of the 400 mm (16-inch) diameter formed by the concrete samples, also rotates a gear oil pump whose outlet pressure is set (Fig. 1 (B)). Thus, in the contact area of the wheel that turns the pump, the frictional stress can be adjusted. The mechanical oil, which is fed from a tank and heated during the passage through the pump, is cooled by passing the temperature through radiators in constant water. The pressure limit valve at the pump outlet also compensates for the oil pressure.

In order to measure the applied on the surface of the concrete samples, a 3 mm diameter load cell was placed inside the sample as shown in Fig 1 (C). To achieve this, a rectangular prism-shaped plastic piece was glued vertically into the mold. A tube with an inner diameter of 3mm was fixed between the curved surface of the mold and this prism. 24 hours later, the mold was opened and the sample was taken out and cured in the water tank for a week. The plastic piece with one end narrower than the other was removed without damaging the concrete sample. The obtained sample with a hollow hole in the middle was cured for one month to increase its compressive strength. The load cell was adhered to this cavity so that the measuring surface coincides with the tunnel opened to the surface. The length of the pin in between was adjusted so that it does not protrude on the surface and is tangential to the surface.

First, the vertical load was adjusted by hanging a weight on the end of the arm so that the pressure value at the peak point was 10 kg/cm^2 . Then, as it passed over the measuring point, the wheel was turned at small fixed intervals of 3 mm, which was one-fifth of the 45 mm contact length. Load values were measured at each stop. By calculating the average compressive stresses, all the compressive stresses of the bell curve were obtained in a realistic way.



Figure 1. Test setup (a) accelerated polishing test machine setup, (b) mold and small tire (c) vertical pressure cell inside the sample

In this study, the maximum vertical pressure was taken as 10 kg/cm^2 considering the heavy vehicle load [14,15]. The average friction stress between the wheel and concrete surface was 1 kg/cm^2 . No abrasive dust or water was applied to the contact interface during the experiment. To prevent the rubber wheel from overheating, the system was run in four-minute periods and the temperature of the rubber was reduced by blowing cold air for 20 minutes. Final polishing was achieved by 100000 drum cycles.

2.3 Method of Friction Coefficient Measurement

Friction coefficients were measured for different wheel transition numbers which are zero, thousand, five thousand, twenty-five thousand, and one hundred thousand. The wet friction coefficient measurements were performed using the British Friction Pendulum with 27 specimens (3 replicates) [16]. A narrow tire friction mount was used in the tests. When the desired number of repeats was reached, five measurements were taken from each sample surface by wetting each time, and the average of the last three measurements was recorded as the result.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

The lowest values of compressive strengths between 62-62.5 MPa were observed in fine aggregate concretes with fineness modules of 2.2. However, the highest values between 65.6-66.0 MPa were seen for concretes with fineness modules of 3.15. As the fineness modulus value of the fine aggregate increased, the compressive strength also increased by 5% to 6.3% in all fine aggregate types. As a result of the hardening test, no change in the macro texture of the concrete surface was observed. Fine-grained aggregate grains emerged because the low strength cement mortar was more prone to wearing (Fig. 2 (A)). Additionally, it can be seen from Figure 2 (B) that the show up of very fine aggregate grains with the wearing cement mortar.

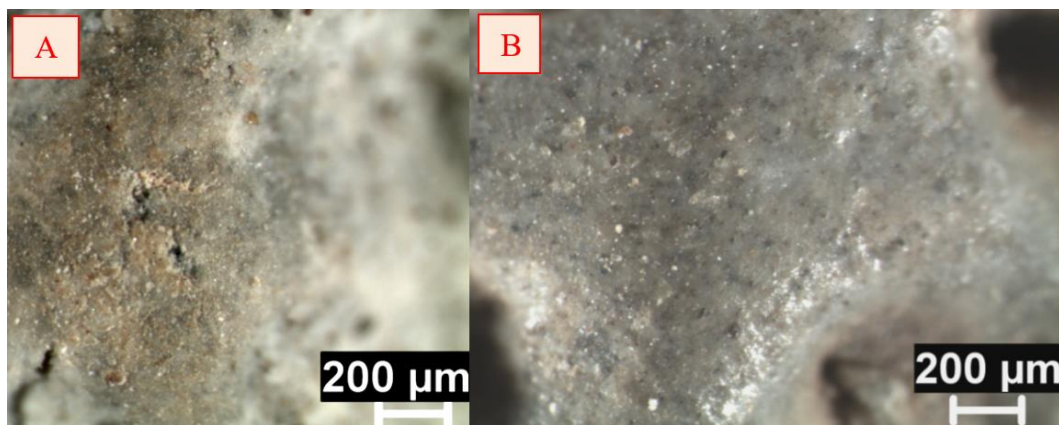


Figure 2. Scanning Electron Microscopy (SEM) pictures; **a.** image of a protrusion on the surface of the concrete specimen before polishing, **b.** image of a projection on the surface because of the polishing process

Variation of friction coefficient in limestone and fine aggregate mixtures is shown in Figure 3. Sample 23 refers to 3rd specimen representing the limestone fine aggregate concrete (C2) with a fineness of 2.7. In general, the wet friction coefficient of the concrete surface decreased as the number of wheel crossings increased. The coefficient of friction decreased rapidly after the first 5000 repetitions. The rate of friction loss decreased considerably in the pickling phase after 5000 repetitions. No significant difference was observed in decreasing friction behavior of limestone aggregates. It can be seen that different fineness module values do not make any difference in the polishing behavior of concrete samples containing limestone. Explanation of samples mixture used in the tests is given at Table 4. The friction loss in limestone and basalt mix concrete samples was lower in three concrete specimens with a fineness modulus of 3.15 (Fig. 4). Additionally, it can be observed that the fineness module has

an impact on polishing behavior. However, as for the concrete samples with basalt aggregates, the fineness module did not affect the polishing behavior as much as limestone aggregates.

Table 4. Explanation of samples mixture used in the tests

Samp.	Explain	Samp.	Explain
11	Limestone and Fine Agg. Mix 1 Samp. 1	41	Limestone- Bazalt/fine Mix 4 Samp.1
12	Limestone and Fine Agg. Mix 1 Samp. 2	42	Limestone - Bazalt/fine Mix 4 Samp.2
13	Limestone and Fine Agg. Mix 1 Samp. 3	43	Limestone - Bazalt/fine Mix 4 Samp.3
21	Limestone and Fine Agg. Mix 2 Samp. 1	51	Limestone - Bazalt/fine Mix 5 Samp.1
22	Limestone and Fine Agg. Mix 2 Samp. 2	52	Limestone - Bazalt/fine Mix 5 Samp.2
23	Limestone and Fine Agg. Mix 2 Samp. 3	53	Limestone - Bazalt/fine Mix 5 Samp.3
31	Limestone and Fine Agg. Mix 3 Samp. 1	61	Limestone - Bazalt/fine Mix 6 Samp.1
32	Limestone and Fine Agg. Mix 3 Samp. 2	62	Limestone - Bazalt/fine Mix 6 Samp.2
33	Limestone and Fine Agg. Mix 3 Samp. 3	63	Limestone - Bazalt/fine Mix 6 Samp.3
71	Mixtures with the fineness modulus of 2.2	91	Mixtures with fineness modules of 3.15

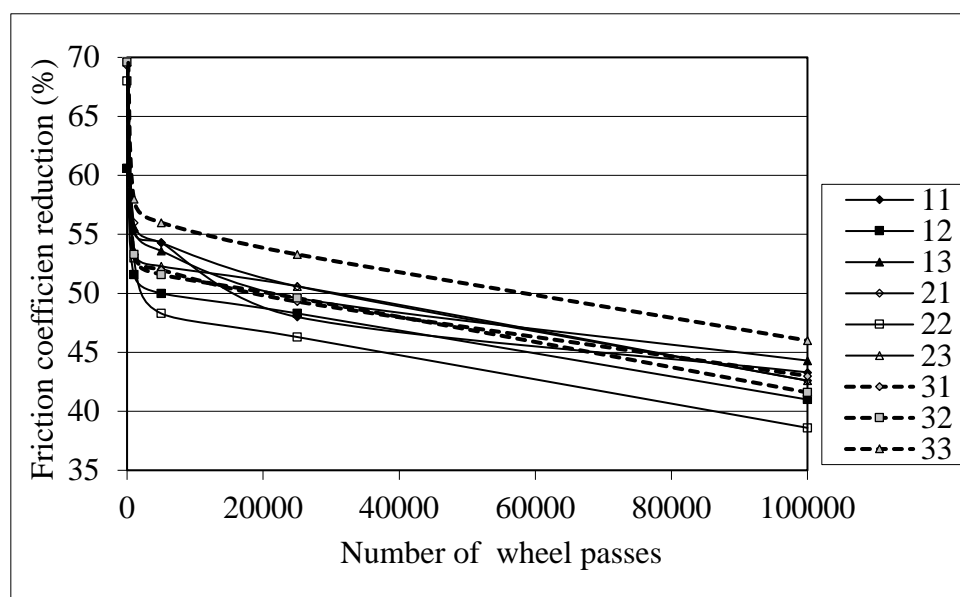


Figure 3. Variation of friction coefficient in limestone and fine aggregate mixtures

The effect of abrasion resistance for fine aggregate on the polishing behavior is demonstrated in Figure 5. The friction loss rate of concretes with the fineness modules of 2.2 was significantly less for basalt fine aggregates. The difference was more pronounced after 25000 repetitions of passing. Therefore, it can be said that the use of fine aggregates with fine abrasion resistance in fine aggregates having a modulus of 2.2 improves the polishing behavior of the concrete surface. Furthermore, the friction loss rate of three samples with basalt aggregates, which have the best abrasion resistance, was significantly lower than the others. Thus, it can be concluded that the use of fine aggregates with high abrasion resistance also affects the polishing behavior of the concrete surface as it is in the 2.2 fineness module.

As for the concretes with fineness module of 3.15, the friction loss rate for the three samples was significantly lower than the other fine aggregate types (Fig. 6). So, the same determination can be made in the results of the polishing of the concrete with a limestone-basalt mixture of various fineness modulus.

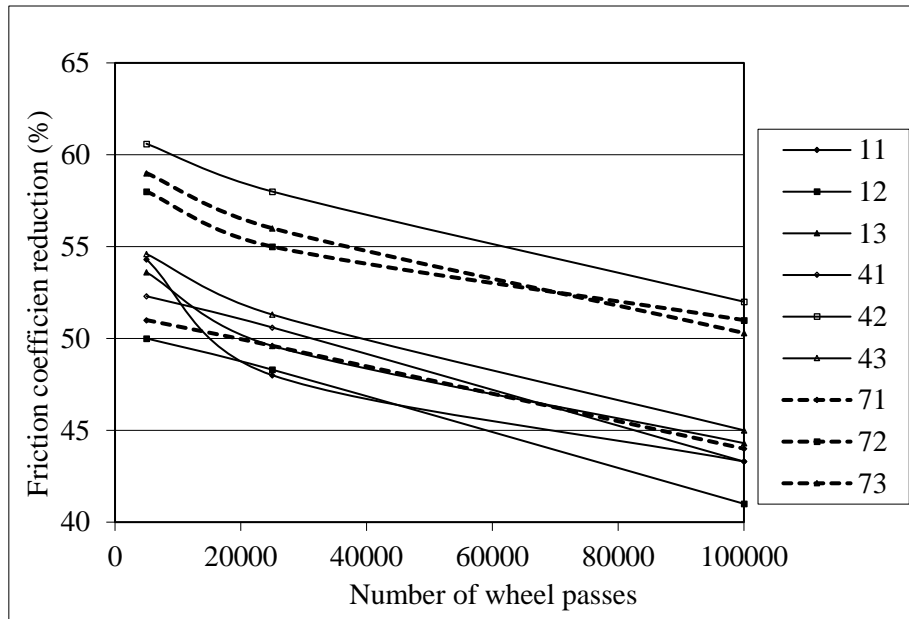


Figure 5. Variation of friction coefficient for mixtures with the fineness modulus of 2.2

The loss of friction decreases as the fine aggregate fineness module increases. Additionally, the least friction loss was observed for samples 61, 62, and 63, which were limestone and basalt mixture samples with the fineness modulus of 3.15. When the result is compared with the literature, similar results were found by a study conducted by Fwa and Tan [8]. In their study, it was reported that the aggregate surface consisted of minerals with different hardness positively affects the friction.

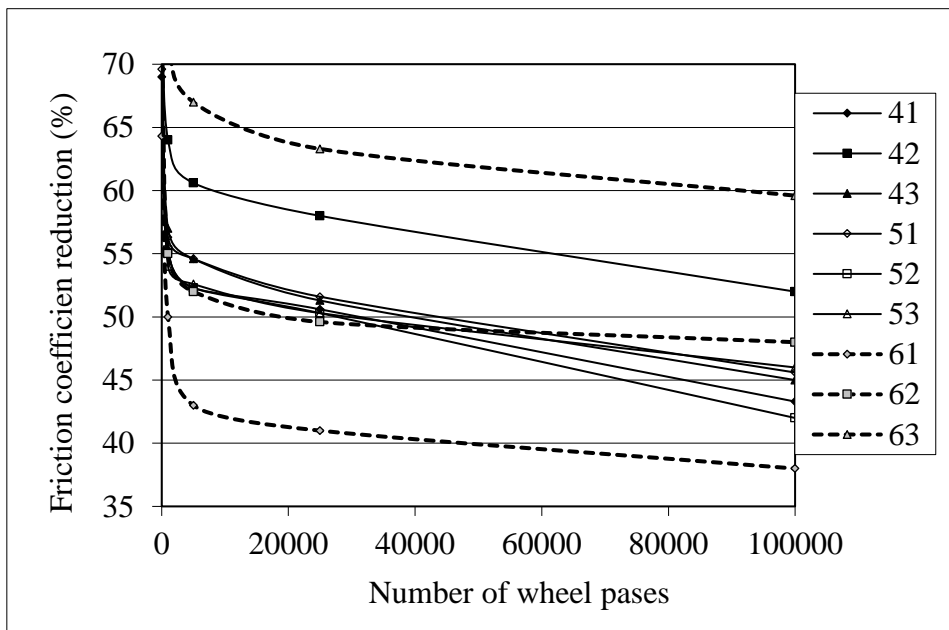


Figure 4. Variation of friction coefficient in limestone, basalt, and fine aggregate mixtures

The results that obtained in this study are compared with the other studies in the literature; In general, it has been seen that abrasion resistance and pressure resistance show different changes according to the type of material used for the change of fineness modulus. Concrete samples with different fineness modulus values were produced using the manufactured sand in a study conducted in 2010, and the pressure and abrasion resistance values were compared. It has been found that increasing the amount of fine material from 4.3% to 20% increases the amount of pressure and improves the wear resistance [17]. In the study conducted by Singh and Siddique in 2015, the fineness modulus was reduced to 1.97 with the coal bottom ash added to the concrete, but no significant change was detected in the compressive strength. However, lower abrasion resistance was observed in the samples with reduced fineness modulus with the addition of coal bottom ash [18]. In a study completed in 2021, concrete was produced in which silica fume (SF), marble slurry powder (MSP), and fly ash was used in certain proportions to produce concrete with high strength values, and as this ratio increased, the fineness value of the obtained samples increased. It has been determined that its strength and wear resistance remain at acceptable rates [19]. The results of this study, as in the studies, showed that the wear results remained within the appropriate values according to the American Society for Testing and Materials [20,21].

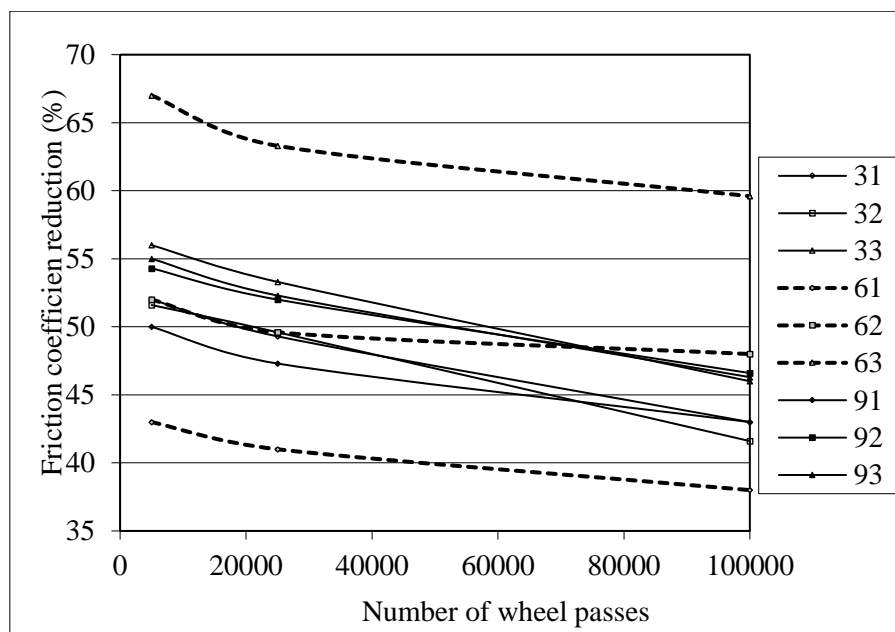


Figure 6. Variation of friction coefficient for mixtures with fineness modules of 3.15

IV. CONCLUSIONS

In this study, the effect of the fineness modulus and abrasion resistance of the fine aggregate in the concrete mixture on the friction coefficient of the road surface were investigated. In the study, the frictions between the wheel and the pavement were examined with a distinctive method, and its usability for future studies was determined. The following results were obtained from the experimental study:

1. Generally, as the fineness module of the fine aggregate increases, the compressive strength increases slightly. However, no significant change in the compressive strength for different fine aggregate types was observed. When the results were examined, similar results were seen in the studies conducted by Fwa and Tan. Accordingly, hard aggregates with high wear resistance have a low tendency to polish [8].
2. The maximum friction coefficient loss was observed for fine aggregate concrete samples containing limestone fine aggregates by considering all fineness module values. Donza et al. In their study, they reached similar results in the case of using fine aggregates [22]
3. While the friction loss in the basalt fine aggregated concrete with a fineness module of 2.7 was considerably lower, the least friction loss percentage in all concretes was obtained for the mixture containing 50% basalt and 50% limestone with a fineness module of 3.15.

REFERENCES

- [1] Taneerananon, P. & Yandell, W.O. (1981) Microtexture roughness effect on predicted road–tire friction in wet conditions. *Wear*, 69(3), 321–337 [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90322-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90322-7)
- [2] Person, B.N.J., Albohr, O., Tartaglino, U., Volokitin, A.I. & Tosatti, E. (2005) On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction, and adhesion. *Journal of Physics Condensed Matter*, 17(1):R1-R62 <https://doi.org/10.1088/0953-8984/17/1/R01>
- [3] David, A., Kuemmel, R.C., Sontag, J.A., Croveti, Y.B., John, R.J. & Allex, S. (2000) Noise and Texture on PCC Pavements. Final report multi-state study, Wisconsin Department of Transportation Kinsman Blvd., Madison, Report Number WI/SPR-08-99.
- [4] Thillainath, C., Peter, S., Manu, G.S., & Tim, S. (2003) Developing a Design Policy to Improve Pavement Surface Characteristics. Transportation Research Board 82th Annual Meeting, National Research Council, Washington D.C.
- [5] Todd E.H., Kurt, D.S., Roger M.L., & Mark E. S. (2003) Current Practice of PCC Pavement Texturing. Transportation Research Board 82th Annual Meeting, National Research Council, Washington D.C.
- [6] Henry, J.J. (2000) Evaluation of Pavement Friction Characteristics. NCHRP Synthesis 291 Transportation Research Board, Washington D.C.
- [7] Hall, J.W. (2009) Guide For Pavement Friction. NCHRP Project 1-43, Transportation Sector of Applied Research Associates (ARA).
- [8] Fwa, T. F. & Tan C.C. (1992) Laboratory Study of Microtexture-Related Skid Resistance Characteristics of Concrete Pavement Materials. *Jour.of Testing and Evaluation*, 20(3), 207-215.
- [9] TS EN 1097-8, (2000) Tests for mechanical and physical properties of aggregates- determination of polished Stone value. TSE, Ankara, Turkey.
- [10] Karpuz, O. (2008) Investigation of the Effect of Fine Aggregate Properties on the Surface Roughness of Concrete Road in Mixture. Ph.D. Dissertation, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.
- [11] Road Technical Specification (2006) General Directorate of Highways of Turkey: 170/2, Ankara.
- [12] TS EN 12390-3, (2002) Hardened concrete tests-Part 3: Determination of compressive strength in test samples. TSE, Ankara, Turkey.
- [13] TS EN 13036-1, (2010) Macro Structure Depth Detection. TSE, Ankara, Turkey.

- [14] Göktan, A. G. & Mitschke, M. (1995) Road Damage Caused by Heavy Duty Vehicles. *International Journal of Vehicle Design*, 16(1) <https://doi.org/10.1504/IJVD.1995.061956>
- [15] Park, D. W., Fernando, E. & Leidy, J. (2005) Evaluation of Predicted Pavement Response with Measured Tire Contact Stresses. *Transportation Research Board*, 1919(1), 160-170 <https://doi.org/10.1177/0361198105191900117>
- [16] TS EN 1341 (2004), Measurement of Resistance to Uncleaned Slip / Flush, TSE, Ankara, Turkey.
- [17] Li, B., Ke, G. & Zhou, M. (2011) Influence of manufactured sand characteristics on strength and abrasion resistance of pavement cement concrete. *Construction and Building Materials* 25(10):3849-3853 <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.004>
- [18] Singh, M. & Siddique R. (2016) Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112(1), 620-630, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.001>
- [19] Choudhary, R., Gupta, R., Nagar, R. & Jain A. (2021) Mechanical and abrasion resistance performance of silica fume, marble slurry powder, and fly ash amalgamated high strength self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 269, 121282, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121282>
- [20] ASTM C127-15, (2015) Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.
- [21] ASTM C131/C131M-14 (2014) Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- [22] Donza, H., Cabrera, O.ve Irassar E. F., High-strength Concrete With Different Fine Aggregate, *Cement and Concrete Research*, 32, 11 (2002) 1755–1761



Araştırma Makalesi

Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

journal homepage: <https://jiens.org>

Kamu binalarında çatı üzeri fotovoltaik panel kurulum potansiyelinin belirlenmesi ve enerji üretim artışı için mimari tasarımın ele alınması: Yalova ili örneği

Furkan Arslan^a, Sunay Türkdogan^{b*}

^aEnerji Sistemleri Mühendisliği, Yalova Üniversitesi, Yalova, Türkiye, 77200

^bElektrik-Elektronik Mühendisliği, Yalova Üniversitesi, Yalova, Türkiye, 77200

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 18 Haziran 2022

Düzeltilme 17 Temmuz 2022

Kabul 26 Temmuz 2022

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Fotovoltaik,
Solar Enerji,
Solar Mimarisi,
Yeşil Enerji

ÖZET

Günümüzde, teknolojik ve ekonomik gelişmelerin artması beraberinde yaşam standartlarını arttırmış ve nüfusun da her geçen gün artmaya devam etmesi yüksek enerji ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. İhtiyacımız olan enerjinin büyük kısmının fosil yakıtlardan üretildiği düşünüldüğünde artan enerji talebinin tükenmekte ve çevreye zararlı olan fosil yakıtlarla karşılanması hem ekonomik hem de çevresel açıdan mümkün değildir. Bundan dolayı daha temiz ve tükenmeyen enerji kaynaklarına yönelim hızla artmaktadır. Tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının direkt veya dolaylı enerji kaynağı güneş olup dünyanın enerji ihtiyacının çok üzerinde bir üretim potansiyeline sahiptir. Ülkemiz coğrafi konumu itibarıyla güneş enerjisinden yararlanma konusunda diğer ülkelere nazaran önemli bir potansiyele sahip olup enerji üretim kapasitesi tüm ihtiyaçları karşılayabilecek büyüklüktedir. Bu çalışmada, bu denli yüksek kapasiteye sahip enerji üretim potansiyelinin Yalova ili genelindeki kamu binalarının çatılarında kurulabilecek güneş enerji santralleri ile ne kadarının karşılanabileceği incelenmiş olup mevcut potansiyelin artırılması için mimari planların tasarım aşamasında nasıl değiştirilebileceği ve mimari optimizasyon ile enerji üretim miktarlarının ne oranda artabileceği gösterilmiştir. Bu çalışma bugüne kadar mimari çizimlerde güneş enerji potansiyelinin göz önüne alınmadığını ancak bundan sonra, çalışmada gösterilen %592'ye kadar artış oranlarıyla birlikte Yalova ili genelinden tüm ülkedeki kamu veya özel bina mimari çizimlerinde solar enerjinin dikkate alınması gerektiğini ve bu vesileyle ülkemize kazandırılacak enerji miktarının ne kadar yüksek olduğunu gösterecektir.

2022 JIENS Tüm hakları saklıdır.

Determination of rooftop photovoltaic panel installation potential in public buildings and consideration of architectural design for energy production increase: a case study of Yalova

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 June 2022

Received in revised form 17 July 2022

Accepted 26 July 2022

Available online

Keywords:

Photovoltaic,
Solar Energy,
Solar Architecture,
Green Energy

ABSTRACT

Today, the increase in technological and economic developments has increased the living standards and the increase in the population has revealed the need for high energy. Considering that the majority of the energy we need is produced from fossil fuels, it is not possible to meet the increasing energy demand by fossil fuels due to both economically and environmentally because the fossil fuels are running out and harmful to the environment. Therefore, the trend towards cleaner and sustainable energy sources is increasing rapidly. The direct or indirect energy source of all renewable energy sources is the sun, and it has a production potential far above the world's energy needs. Due to its geographical location, our country has a significant potential to benefit from solar energy compared to other countries, and its energy production capacity is large enough to meet all needs. In this study, it has been studied how much of the energy production potential with such a high capacity can be met by solar power plants that can be installed on the roofs of public buildings in Yalova province, and it is shown how architectural plans can be changed to increase the existing potential during the design stage and how much energy production can be increased with architectural optimization. This study will show that solar energy potential has not been taken into account in architectural drawings until now, but with up to 592% increase rates shown in the study from now on, solar architecture should be taken into account in public or private building architecture plans throughout the country from Yalova province and on this occasion how high the amount of energy that can be brought to our country is.

2022 JIENS All rights reserved.

I. GİRİŞ

Dünya nüfusunun ve teknolojinin artmasıyla birlikte fosil yakıtların kullanımı da artış göstermiştir ve bu yakıtların yakılmasından kaynaklanan zararlı sera gazı emisyonları, küresel ısınmanın her geçen gün daha da etkili olmasına

neden olmaktadır [1]. Çevreye salınan gazların, güneş ışınlarının atmosferde daha uzun süre kalmasına ve yer küreye tekrar geri yansımaya neden olmakta ve bu da küresel ısınmaya neden olmaktadır. Küresel ısınma hem faunayı hem de florayı olumsuz etkilemektedir [2]. Bu gibi sorunların giderilmesi için ve fosil yakıt bağımlılığını azaltmak için temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı yaygınlaşmaktadır [3]. Başlıca yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle enerjileridir [4].

Dünyanın en önemli ve en yaygın yenilenebilir enerji kaynağı güneş olup jeotermal haricindeki diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının oluşumundaki ana etkidir. Son yıllarda güneş enerjisi, yerel uygulanabilirliği, gelişen teknolojilerle birlikte enerji üretim kapasitesinin artması ve enerji piyasalarındaki durmak bilmeyen fiyat artışları gibi nedenlerle tercih edilen bir enerji kaynağı haline gelmiştir [2]. Güneş enerji sistemlerinin yaygınlaşması durumunda enerji konusunda dışa bağımlılık azalacak ve bu sayede ekonomik ve çevresel fayda sağlanmış olacaktır [4].

Enerji tüketim miktarı, ülkelerin teknolojik ve ekonomik yönden gelişmişlik seviyesini gösteren önemli parametrelerden bir tanesidir. Ülkemizde de artan teknolojik ve ekonomik gelişmeler beraberinde artan bir enerji gereksinimini doğurmuştur. Artan enerji gereksinimini karşılamak için, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de fosil yakıtlara alternatif olarak temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaşmaktadır [5]. Dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının birincil enerji kaynaklarına katkısı 2019'da %27 iken 2020'de %29'a yükselmiştir [6].

Türkiye'de 2020 yılı itibari ile üretilen toplam enerji miktarı 306.73,1 GWh'dır. Güneş enerjisinden üretim 10.950,2 GWh ve toplam üretimin %3,57'sine denk gelmektedir. Türkiye'de üretilen enerjinin %57,74'ü fosil yakıtlardan karşılanırken geri kalan kısım yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmektedir [7]. Yapılan araştırmalar tüm enerji tüketiminin %40'ının binalar tarafından yapıldığını göstermiştir [8].

Güneş enerjisi yüksek bir üretim kapasitesine sahip olmasına rağmen mimari planlarda bu enerjiden daha fazla yararlanılabilmesi için yapılan çok fazla çalışma yoktur. Bu nedenle, 2009-2012 yılları arasında Uluslararası Enerji Ajansı tarafından (IEA SHC Task 41) "Güneş Enerjisi ve Mimarisi" projesi yürütülmüştür [9]. Yakın geçmişte ise California Bina Standartları Komisyonu, bölgede kurulacak olan yeni binaların güneş enerji sistemleri içermesi gerektiğini ve 2020'de uygulanmaya başlayacağını duyurmuştur [10]. Bu ve benzeri yasalar/çalışmalar, bina mimarisinde güneş enerjisi sistemlerinin kullanılmasını teşvik etmekte ve daha verimli enerji üretimi için mimari planlarda dikkat edilmesi gereken hususları ortaya koymaktadır [9]. Bu çalışmada ise Yalova ili genelindeki kamu binalarının çatılarında kurulabilecek güneş enerji santrallerinin mevcut enerji üretim potansiyelleri ortaya konacak olup bugüne kadar hiçbir mimari planda dikkat edilmeyen unsurlarla binanın çatı revizyonunun tasarımı aşamasında yapılması sonucu ortaya çıkabilecek enerji üretim kapasitesi artışının ne kadar olabileceği ortaya konmuş olacaktır. Yapılan bu çalışma birçok konuda teşvik edici olup bundan sonraki süreçlerde mimari planların yapımında bazı standartların ortaya çıkmasına, milli ve yerli daha fazla enerji üretiminin gerçekleşmesine ve birçok çalışmaya referans olmasına vesile olacaktır.

1.1 Dünyada Güneş Enerji Potansiyeli

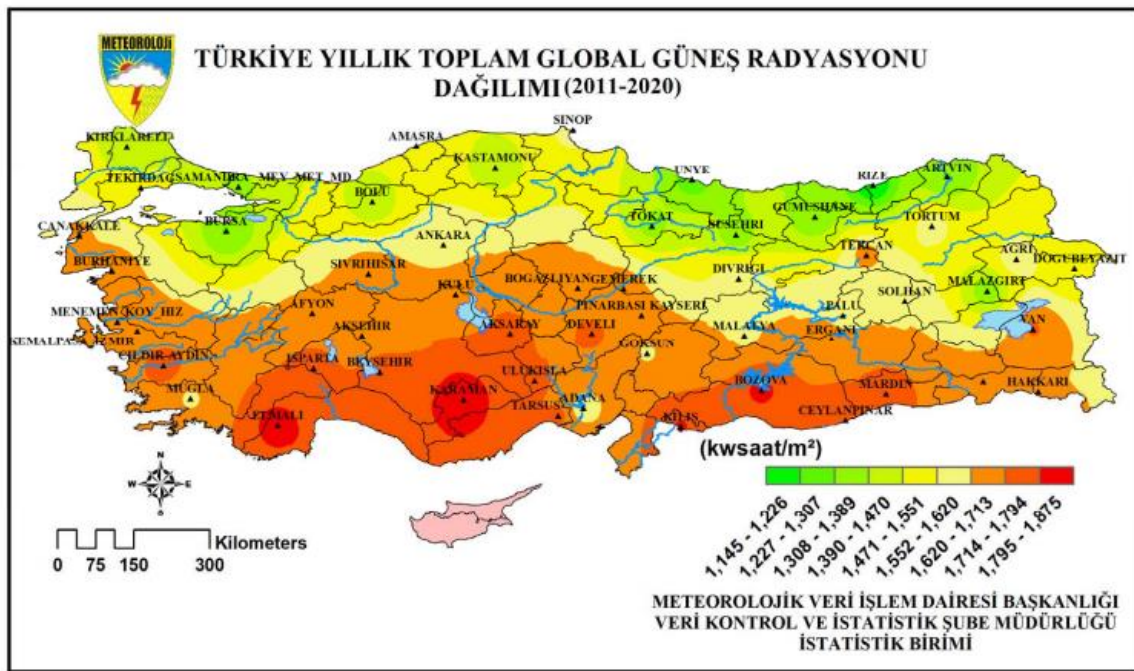
Güneşten dünyaya gelen güneş enerjisi tüm dünyanın enerji ihtiyacının çok üzerindedir. Dünya ya düşen bir yıllık güneş enerjisi miktarı geçmişten günümüze kadar kullanılan toplam fosil yakıtın çok daha fazlasına karşılık gelmektedir. Yer yüzeyine ulaşan ortalama güneş enerji yoğunluğu yaklaşık 1,37 kW/m²'dir [11]. Dünyanın yıllık elektrik enerjisi ihtiyacı yaklaşık 17,000 TWh iken güneşten dünyaya gelen günlük enerji miktarının 174.000 TWh olduğu düşünülmektedir. Bu durum güneşten gelen birkaç saatlik enerjinin tüm dünyanın enerji ihtiyacını sağlayabileceğini ortaya koymaktadır [12].

Gelen güneş ışınlarının dik olarak yer yüzüne inmesinden dolayı güneş enerjisinin en yoğun olduğu bölge Ekvatorun 35° kuzey ve güney enlemleri arasındaki bölgesidir. Bu bölgelerde enerji kazanımı da daha yüksek olmaktadır. Yılda 2000 ila 3500 saat güneş alır ve yaklaşık güneş enerji potansiyeli 3,5-7 kWh/m²/gün arasında değişmektedir. Dünya üzerindeki ortalama yıllık güneş radyasyonu miktarı kurak bölgelerde 2000-2500 kWh/m²'dir. Daha üst enlemlerde bu değer 1000-1500 kWh/m² arasında değişmektedir [11].

Ref [6]'daki verilere göre 2021 yılına gelindiğinde güneş enerjisinden elektrik üretiminin önemli oranda arttığı görülmektedir. Küresel olarak, PV elektrik üretiminin 145 TWh artarak (%18) 2021'de 1000 TWh'ye ulaştığı görülmektedir. Tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı 2021 yılında %30 civarlarında olup dünyada birçok ülkede yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimi ve yenilenebilir enerji payı dünya genelinde hızla artmaktadır [6].

1.2 Türkiye'de Güneş Enerji Potansiyeli

Türkiye coğrafi konumundan dolayı güneş enerjisi potansiyeli bakımından önemli bir yere sahiptir [2]. Şekil 1'de ülkemizin güneş radyasyonunun dağılımı gösterilmiştir. Koyu kırmızı ile gösterilen iller en fazla radyasyonun olduğu iller olup güneyden kuzeye doğru gidildikçe güneşlenme potansiyeli Ekvator bölgesinden uzaklaştığı ve kuzey bölgesindeki fazla yağışın güneş ışınlarını engellenmesinden dolayı azalmaktadır [4]. Bu nedenle ülkemizde en az ışınım Karadeniz bölgesinde olmaktadır. Karadeniz bölgesini sırasıyla Marmara, Doğu Anadolu, İç Anadolu, Ege, Akdeniz ve Güney Doğu Anadolu bölgeleri takip etmektedir. En fazla ışınım alan bölgemiz Güney Doğu Anadolu bölgesidir [5, 13].



Şekil 1. Türkiye'nin yıllık toplam güneş radyasyonu dağılımı [14]

Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlas'ına (GEPA) göre, Türkiye'nin yıllık toplam güneşlenme süresi 2737 saat, yıllık toplam gelen güneş enerjisi ise 1527 kWh/m²'dir [13, 14]. Bu değerler güneş enerjisi kurulu gücü yüksek olan birçok ülkenin çok üzerinde olmasına rağmen Türkiye'de güneş enerjisi potansiyelinden yeterince yararlanılmamaktadır [2, 11]. Güneş enerjisinin avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da vardır. Geniş arazi ihtiyacı, panellerin yerleşim sorunu, ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, depolama için yüksek maliyet gibi etkenler güneş enerjisine yapılacak olan yatırımları kısıtlamaktadır. Bu çalışmada geniş arazi ihtiyacı ve panellerin yerleşim sorunlarına karşı çatı üzeri kurulum ve optimum mimari ile daha verimli panel yerleşimi yaparak çözüm bulmaya çalışacağız.

1.3 Binalarda Güneş Mimarisinin Önemi

Güneş radyasyonundan en verimli şekilde yararlanmanın yolu bina mimarisinin buna uygun yapılmasıdır. Binadaki pencere duvar oranı, binanın yüksekliği, yönü ve çatı yapısı güneş enerjisinden yararlanmayı doğrudan etkilemektedir. En büyük etkenlerden birisi de bölgenin güneş enerji potansiyelidir. Güneş radyasyonunda yıl boyunca değişimler gözlemlenmektedir. Tasarımı yapılacak olan bir binanın çeşitli bölgelerindeki güneşlenme

süresinin ve güneş radyasyonunun ölçülmesi uygun bir proje tasarımı için gereklidir [15]. Binalar enerji kullanımı açısından önemli bir yere sahip olduklarından uygun mimari tasarımlarla kendi enerjilerini tamamen veya büyük bir çoğunlukla üretebilirler. Enerji fiyatlarındaki artışlarla birlikte tüm binalar sıfır enerjili bina yaklaşımını benimsemek durumunda kalacaktır [16]. Bu sayede binalar için üretilcek başka enerjiye gerek olmadan kaynakların daha etkin ve verimli kullanılması sağlanmış olacaktır [2,17].

1.3.1. Pasif Solar Enerji Teknolojisi

Pasif güneş enerji teknolojisi, güneş enerjisinin herhangi bir mekanizma kontrol sistemi olmadan toplandığı, korunduğu ve dağıtıldığı anlamına gelir. Binadan izole edilemez [2, 16]. Pasif güneş mimarisi, minimum çevresel etki ile maksimum yaşam kalitesini hedefler. Pasif güneş enerjisi, bina içindeki ısıtma ve gün ışığı açısından etkilidir [15]. Pasif güneş enerji bina tasarımı ve enerji tasarrufu açısından önemlidir. Güneşten gelen enerjiyi kullandıkları için binanın diğer enerji kaynaklarından enerji tüketimini azaltmış olur [18].

1.3.2. Aktif Güneş Enerjisi Teknolojisi ve Solar PV Teknolojisi

Aktif güneş enerji teknolojisi, binaların çatıları ve cepheleri kullanılarak güneş enerjisi sistemleri (solar termal ve/veya solar fotovoltaik) vasıtasıyla enerji üretilmesidir [10]. Aktif solar termal sistemler, ısı enerjisi üretmek için güneş enerjisini toplayan, koruyan ve bu enerjisinden yararlanmak için mekanik ekipman ilavesi içeren sistemlerdir [2]. Bu teknoloji ile genellikle kullanım suyu ısıtma ve alan ısıtma uygulamaları yapılmaktadır. Kurulacak olan kollektörler genellikle binanın çatısına kurulur ve ısı dağılımı otomatik kontrol edilir [16].

Bir diğer aktif güneş enerji teknolojisi ise solar fotovoltaik sistemlerdir. Bu sistemler binanın elektrik enerji ihtiyacını herhangi bir hareketli aksam olmadan güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine çevirmesiyle sağlamaktadır. Aktif olarak kullanılmayan bina çatıları solar termal ve fotovoltaik panellerin kurulumu için uygun olup maksimum enerji elde edilmesi için doğru yönün, optimum açının ve minimum engel/gölge oluşturacak şekilde bir tasarımın yapılmasını gerekli kılmaktadır.

1.4 Güneş Enerjisi Kullanan Binaların Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Güneş enerjisinden maksimum oranda yararlanabilmemiz için güneşten gelen ışınlarla solar termal veya solar fotovoltaik panellerimizin yüzeyinin birbirine dik olması gerekmektedir. Işınlardan geliş açısı 90° 'den ne kadar çok ayrılırsa elde edilebilecek enerji oranında da o denli bir düşüş söz konusu olmaktadır. Ancak güneş ışınları dünyanın dönüş hareketinden dolayı sürekli sabit konumda ve sabit açıyla gelmediğinden güneş enerji santrallerinin kurulduğu lokasyonlarda kullanım amacına göre sabit bir açı belirlenmektedir. Bu açı panellerin yatay düzleme olan açısı olup tüm sezonlar için santralin kurulduğu lokasyondaki enlem açısı civarında, yaz sezonu için enlem açısından 15° daha eğik, kış aylarında ise 15° daha dik olacak şekilde planlanmaktadır. Yazın güneş ışınlarının daha dik, kışın ise daha yatay gelmesinden dolayı paneller güneş ışınları arasında 90° 'ye yakın bir eğim olması istendiğinden kış aylarında $+15^\circ$ yaz aylarında ise -15° açı farklılığı olmaktadır. Bunların yanı sıra tek eksenli veya iki eksenli takip sistemleri kullanılarak panellerin güneşin pozisyonunu takip etmesiyle güneş enerjisinden maksimum oranda yararlanılmış olur. Genelde yapılan çalışmalar yıl bazlı ve tüm sezon boyunca enerji üretimi için tasarlandığından panellerin sabit kurulum açısı bulunulan lokasyonun enlemine yakın değerlerdir. Panellerin baktığı yön ise bulunulan yarımkürenin tam zıt yönü olmalıdır ki güneş ışınlarından gün boyunca faydalanılsın. Tam kuzey veya tam güney yöne bakmayan panellerin optimum açıdan kayması üretimdeki verimliliği düşürmektedir. Bu makale için yapılan çalışmalar Yalova ili için gerçekleştirildiğinden panel yönleri mümkün olduğunca tam güney, panel açıları ise çeşitli benzetimler sonucunda çatı üzeri kurulum özelinde optimum 31° olarak belirlenmiştir [17].

Güneş enerjisi büyük bir potansiyele sahip olmasının yanında büyük bir yer işgaline neden olmaktadır. Ancak binalardaki eğimli veya düz çatılar enerji elde edilmesi için uygun bir ortam sağlamakta olup çatı üzeri santral kurulumu git gide artmaktadır. Çatı üzeri kurulumlarda sadece güneşin geliş açısı değil aynı zamanda panelin soğumasına veya çok ısınmasının önüne geçebilecek doğal havalandırma etkisi yaratılmalı ve rüzgâr geliş yönlerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Güneş mimarisinde sadece güneş radyasyonu miktarı önemli olmayıp panellerin kurulumu yapılacak olan yüzeye çevre binaların, bitkilerin veya çeşitli objelerin neden olduğu potansiyel gölgeleme koşulları da araştırılmalıdır [16]. Paneller üzerine şu veya bu nedenlerle gelen her gölge

üretilebilecek olan enerji miktarında büyük düşümlere neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra güneş panellerinin aşırı ısınmasına ve işlevsiz hale gelmesine de neden olabilmektedir.

Gelen güneş ışın açışı ve gölge etkenleri dışında panel verimliliği bağıl nemin artmasıyla birlikte de düşmektedir. Bağıl nemin yüksek olduğu yerlerde panellere gelen güneş ışınlarının dik gelmesinin önüne geçilmiş olmaktadır. Bağıl nemin %17'den %25'e çıkması durumunda, güneş ışınları 950 W/m^2 değerinden 500 W/m^2 değerine düştüğü örnek olarak verilmektedir [4]. Yalova ilinin yıllık ortalama bağıl nem oranı %76'dır [14].

Kurulum şekline bakmaksızın güneş enerji santrali kurulumunda enerji üretim performansını etkileyen aşağıdaki parametreler dikkate alınmalıdır.

Binanın bulunduğu yer; güneş panellerinin kurulumunun yapılacağı arazinin özellikleri, mimari tasarıma başlamadan incelenmelidir [19]. Güneş ışınımının, hava sıcaklığının, hava hareketi ve nem gibi iklim elemanlarının önceden ölçülmesi ayrıca arazinin eğim özellikleri bilinmesi ve bu doğrultuda proje geliştirilmesi gerekmektedir [20].

Binanın diğer binalara göre konumu; binanın konumu, güneşten gelen ışınım miktarını etkileyen, binanın çevresindeki hava akış hızını ve tipini belirleyen önemli bir faktördür. Binanın çevresindeki diğer yapıların yüksekliği, bina çatısına kurulan güneş panellerine gölge oluşturması konusunda önemlidir. Bu nedenle binanın arazideki konumu özellikle güneş enerjisinden yararlanmak için uygun olarak belirlenmelidir [20].

Binanın yönü; Binanın yönü cephelerin doğrudan güneş ışınımından yararlanması ve güneş enerjisi kazancını etkileyen önemli bir parametredir. Güneş panellerinde maksimum verim alınabilmesi için paneller ekvator çizgisine paralel olacak şekilde dizilmeli ve yönü ekvatora bakmalıdır [20].

Gölgeleme (Shading); gölgeleme güneş panellerinin verimini etkileyen diğer bir parametredir. Kullanılacak olan panellerin arazi durumuna bağlı olarak veya binanın kendi durumundan kaynaklı gölgelemeler olabilmektedir. Binanın çatısında bulunan bacalar, antenler, depolar ve duvarlar güneş panellerin verimliliklerini önemli oranda etkilemektedir. Bu yapıların çatının ekvator çizgisinin zıt yönüne bakan tarafına (Türkiye için Kuzey) konumlandırılması gölgelemeden kaynaklı enerji eldesinin azalmasını önüne geçecektir [19].

II. DENEYSEL METOD

Bu çalışmada, Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan Yalova ilinde bina mimarisinin güneş enerjisi üretim potansiyeline olan etkileri araştırılmıştır. Yapılan tüm çalışmalar Sketchup, Skelion, PVGIS ve PVWatts çizim ve benzetim programları kullanılarak yapılmıştır. Yapılan çalışma Yalova ilindeki birçok kamu binasını kapsamakta olup ağırlıklı olarak Yalova Üniversitesi Merkez Kampüsünde bulunan binalar üzerinden yürütülmüştür.

2.1 Yalova'nın iklim şartları

Güney Marmara Bölgesi'nde yer alan Yalova, $28^{\circ} 45'$ ve $29^{\circ} 35'$ Doğu Boylamları, $40^{\circ} 28'$ ve $40^{\circ} 45'$ Kuzey Enlemleri arasında bulunan 893 km^2 bir ildir. Yalova'da, Akdeniz ve Karadeniz iklimlerinin özelliklerini göstermesi nedeniyle makro klima iklim tipi olduğu söylenebilir. Kış mevsimi yağışlı ve orta sıcaklıkta, yaz mevsimi ise sıcak ve kuraktır. Yıllık ortalama sıcaklık değeri $17,7^{\circ}\text{C}$ 'dir. Yalova ilinin güneş ışınması ortalaması yaklaşık $1303\text{-}1389 \text{ kWh/m}^2$ değerlerindedir [5]. Günlük olarak metre kare başına düşen radyasyon miktarı en fazla temmuz en az ise aralık ayındadır [21]. Yalova iline ait meteorolojik veriler NASA veri tabanından alınarak Tablo 1 hazırlanmıştır [22]. Değerlere göre de en çok güneş radyasyonu temmuz ayında en düşük ise aralık ayında gerçekleşmiştir [14]. En yüksek ve en düşük aylarda değişim oranı %388,52'tir.

Panel sıcaklıkları direkt olarak ortam sıcaklığına bağlı olduğundan kurulum gerçekleşecek ortamdaki hava sıcaklığı da önemlidir. Verimli enerji üretimi her zaman soğuk ortamda ve güneş ışınlarının geldiği aydınlık ortamda gerçekleşmektedir. Tablo 1'de belirtildiği üzere Yalova ilinin en sıcak ayı Ağustos olup $23,71^{\circ}\text{C}$ ortalama sıcaklığa sahipken en düşük sıcaklık ise ocak ayında ve $4,94^{\circ}\text{C}$ ortalama sıcaklığa sahiptir.

Tablo 1’de ayrıca Yalova’nın aylara göre ortalama günlük güneşlenme süresi görülmektedir. Yaz aylarında gündüzlerin daha uzun olması güneşlenme süresinin fazla olmasına neden olmuştur. Kışın ise geceleri daha uzun olduğu için güneşlenme süresi daha azdır. Yıllık olarak ortalama günlük güneşlenme süresi 7,9 saattir. Güneşlenmenin en yüksek ve en düşük olduğu aylar arasında %188’lik değişim gerçekleşmiştir. Tabloda aynı zamanda eşdeğer güneşlenme sürelerinde belirtilmiştir [19]. Ülkemizde ve bu coğrafyada kullanılan paneller büyük çoğunlukla standart test koşullarında (1000 W/m²) test edilip ona göre etiket değerleri oluşturulmaktadır. Eşdeğer güneşlenme direkt olarak m² başına 1000 W’lık güneş radyasyon değerinin geldiği durumu baz aldığından panellerin güç değerleriyle eşdeğer güneşlenme değerlerinin çarpımından günlük üretilebilecek enerji miktarı yaklaşık olarak bulunmaktadır. Netlik indeksi ise bir lokasyondaki belirli bir sürede gelen güneş ışınım miktarının aynı lokasyondaki teorik maksimuma olan oranıdır. İndeksin artış göstermesi o lokasyondaki güneş ışığından maksimum oranda yararlanılabileceği anlamına gelmektedir.

Tablo 1. Yalova’nın iklim özellikleri [22]

Aylar	Günlük ortalama sıcaklık değerleri (°C)	Güneşlenme süresi (h)	Eşdeğer Güneşlenme süresi (h)	Radyasyon miktarı (Kwh/m ² /gün)	Netlik indeksi
Ocak	4,940	4,6	1,67	1,670	0,405
Şubat	5,030	5,4	2,31	2,310	0,418
Mart	7,160	6	3,49	3,490	0,463
Nisan	11,630	7,3	4,46	4,460	0,466
Mayıs	16,380	9,3	5,91	5,910	0,537
Haziran	20,940	11,7	6,71	6,710	0,579
Temmuz	23,490	12,1	6,79	6,790	0,602
Ağustos	23,710	11,3	5,93	5,930	0,588
Eylül	20,200	9,8	4,69	4,690	0,571
Ekim	15,610	7,1	2,99	2,990	0,489
Kasım	10,700	5,6	1,88	1,880	0,424
Aralık	6,690	4,2	1,39	1,390	0,375

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Daha öncesinde de açıklandığı gibi Yalova ilindeki çoğu kamu binası incelenmiş ancak ağırlık Yalova üniversitesi merkez kampüste bulunan mühendislik fakültesi ve İslami ilimler fakültesi binalarına verilmiştir. Detaylı açıklama bu iki bina için verilecek olup diğer kamu binalarına ait simülasyon sonuçları mimari gelişim öncesi ve sonrası olmak üzere daha yüzeysel olarak verilecektir. Çalışmanın sonunda mimari planda yapılan değişikliklerle birlikte binaların çatıları üzerinden elde edilebilecek enerji değerleri karşılaştırılacak ve yüzde olarak meydana gelen artış oranları tablo halinde sunulacaktır. Şekil 2’de Yalova üniversitesi mühendislik fakültesi ve İktisadi İdari Bilimler fakültelerinin uydu görüntüleri yer almaktadır. Kampüs içerisindeki binalara ait çizimler Sketchup programı kullanılarak ve Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı’ndan alınan mimari projeye göre çizilmiştir.

Şekil 2 Yalova Üniversitesi Merkez kampüsüne ait bir uydu resmini göstermektedir. En sağda bulunan bina mühendislik fakültesine ait olup binanın lokasyonu güneş panel kurulumu için elverişli yöndedir. 3D çizimler Sketchup’ta çizilmiş olup çizilen binalardaki farklı yüzeylere Sketchup programına eklenti olan Skelion programı ile panel yerleşimi en uygun şekilde ve gölgelemeler dikkate alınarak yapılmıştır.

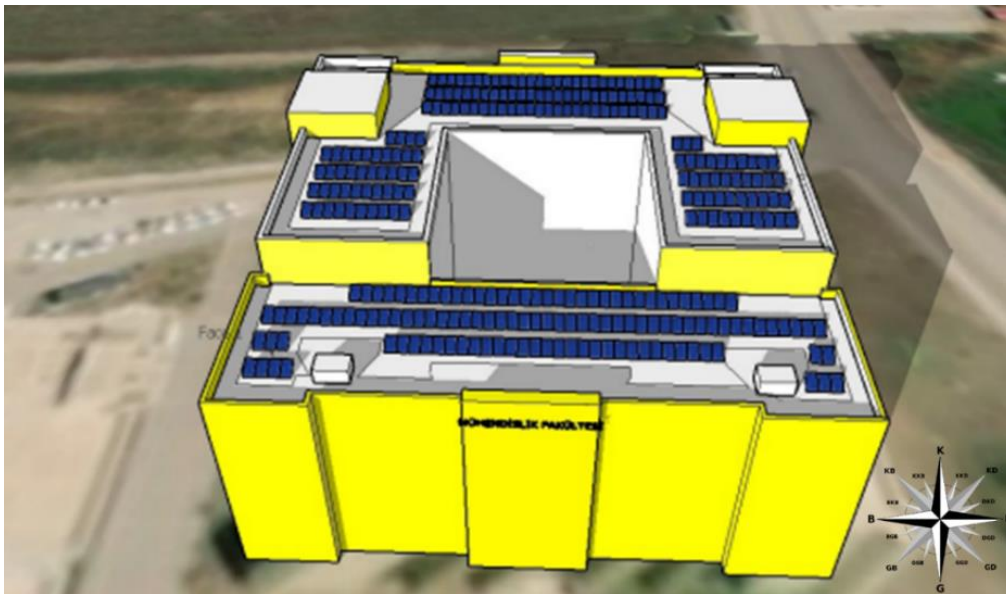
Şekil 3 Yalova üniversitesi mühendislik fakültesi binasının mevcut haliyle çizilen bina ve muhtemel panel kurulumunu göstermektedir. Bina çatısında havalandırma çıkışları, merdiven çıkış odası ve çatının ortasında da büyük bir boşluk mevcuttur. Skelion ve PVGIS programları kullanılarak çatı alanının güneşin etkin olduğu saatlerde (10:00-15:00 arası) gölgeleme durumu hesaplanmış ve Şekil 3’te detaylıca gösterilmiştir [23]. Görüleceği üzere yüksek duvara yakın yerler, baca kenarları, havalandırma kenarları ve merdiven yapısı civarında kalan yerler gün boyunca gölgeye maruz kalmakta, bundan dolayı bu alanlara panel kurulumu önerilmemektedir. Bu durum mevcut çatı alanının etkin kullanılmamasına ve kapasitenin altında enerji üretimine neden olmaktadır.

Şekil 3’te görülen panellerin yerleşimi binanın ön ve arkasının kuzey ve güney cepheye bakmasından dolayı herhangi bir azimut açısına ihtiyaç duymadan yapılmıştır. Çatı incelendiğinde çatının çok katlı yapıya sahip olduğu ve giderek artan çatı kat yüksekliğinin kuzey cepheye doğru olduğu görülmektedir. Bu da en güneydeki katın diğer kata gölge yapmasının önüne geçmiş olup uygun bir mimari tasarıma sahiptir. Ancak çatının yükselme mimarisi

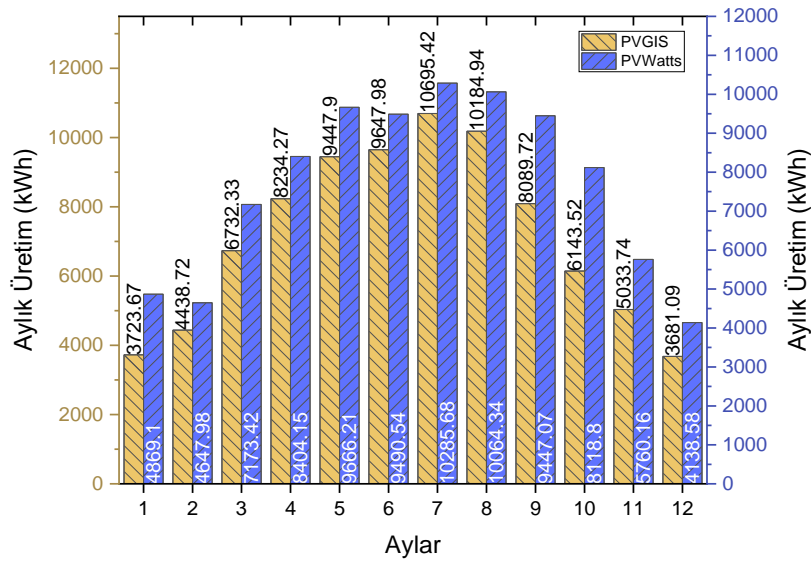
dışındaki diğer güney cephede kalan gölge unsurları binanın potansiyelinin altında enerji üretmesine neden olmaktadır. Benzetim için AİDE SOLAR 230 W paneller (1,64 m x 0,99 m) tercih edilmiştir. Binaın mevcut haliyle ve gölgelenmenin olmadığı noktalara toplamda 287 adet panel kurulumu yapılmış ve bu panellerden elde edilen enerji değerleri aylara göre Şekil 4'te farklı iki programdaki (PVGIS, PVWatts) benzetim sonuçlarına göre karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir [21]. Her iki programdan alınan değerler birbirine çok yakın olup yapılan benzetimlerin doğruluğunu ortaya koymaktadır. PVGIS'ten alınan sonuçlara göre binanın mevcut haliyle üretebileceği yıllık enerji değeri 86,053MWh/yıl'dır. Aynı sistemin PVWatts programı ile elde edilen üretebilecek enerji değeri ise 96,066 MWh/yıl'dır [24]. İki programın birbirinden farklı olması, kullandıkları veri tabanlarının farklı ve seçilen lokasyona en yakın verinin farklı uzaklıklardaki sensörlerden alınmasından kaynaklanmaktadır. PVGIS; -cmsaf, -sarah, -era5, -cosmo veri tabanlarını kullanırken PVWatts; NSRDB gridded data, usa tmy2, usa tmy3 ve international station veri tabanlarını kullanmaktadır. Bundan dolayı %11 gibi bir fark meydana gelmektedir. PVWatts Amerika Birleşik Devletleri tarafından üretilmiş olup PVGIS Avrupa birliği tarafından oluşturulmuştur. Avrupa'da bulunan bir lokasyon için PVGIS'in daha sağlıklı sonuç vereceği düşüncesiyle yorumlar ağırlıklı olarak PVGIS sonuçlarına göre yapılmıştır.



Şekil 2. Yalova üniversitesi merkez kampüs uydü görüntüsü

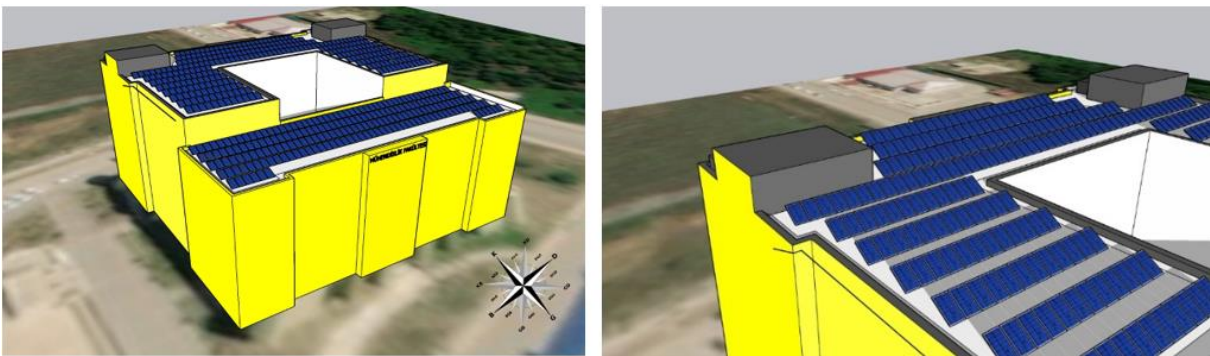


Şekil 3. Mühendislik fakültesinin mevcut tasarımına ait çatı üzeri güneş panelli 3D çizim ve gölgeleme görseli



Şekil 4. Mühendislik fakültesi binasının mevcut durumdaki panel kurulumuyla üretebileceği enerji değerlerinin farklı iki programa göre karşılaştırması

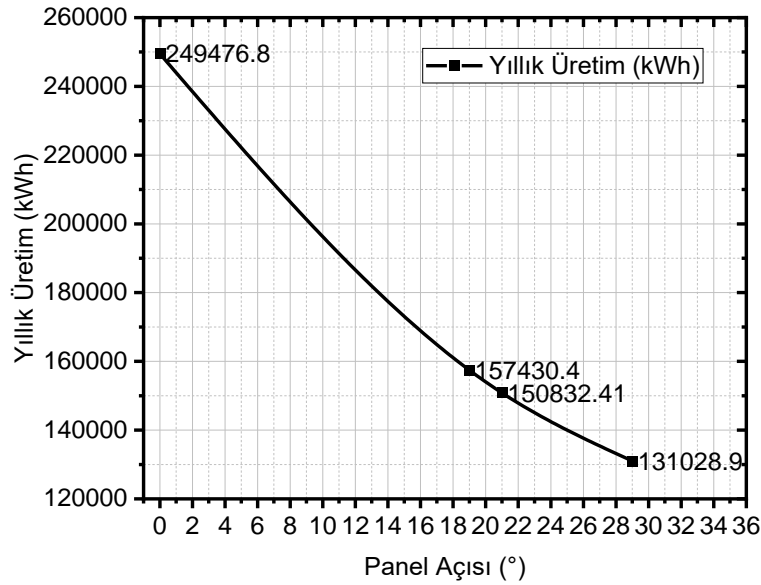
Şekil 4 incelendiğinde enerji üretim değerlerinin aylara göre değiştiği gözlenmiş ve en yüksek enerjinin temmuz en düşük enerjinin ise aralık ayında üretildiği görülmüştür. Üretim değerleri Yalova iline ait Tablo 1’ de verilen solar radyasyon değerleriyle paralel olarak değişmiştir. Ancak mayıs ayından haziran ayına geçişte artması beklenen enerji miktarının hem PVGIS’ te hem de PVWatts’ta azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni panellerin 31 derecelik eğim açılarının haziran ayındaki tam tepe nokta olan güneşe göre optimize edilmemiş olmasıdır. Panel kurulumu tüm sezonları kapsayacak şekilde düşünüldüğünden mevcut açı ile her ne kadar solar radyasyon değeri artsa da elde edilen enerji miktarının artmadığı görülmektedir. Mayıs ayından haziran ayına geçişte meydana gelen yüksek sıcaklık artışı da panellerin verimliliğinin bir miktar düşüp elde edilen enerjinin azalmasına neden olan ikincil etmenlerden bir tanesidir. Mevcut binadan üretebilecek maksimum enerji minimum enerjinin neredeyse üç katıdır. Temmuz ve aralık aylarına ait solar radyasyon değerleri karşılaştırıldığında temmuz ayı değeri aralık ayının 4,88 katı olduğu görülmektedir. Bu durumda temmuz ayı enerji üretim değeri aralık ayına göre 4,88 kat olması beklenirken değer tam olarak 2,9 katıdır. Buradaki farklılığın nedeni artan sıcaklık kaynaklı panel verimliliğinin düşmesi ve eğim açısının güneş ışınlarını kesmedeki uygun açıdan sapmasıdır.



Şekil 5. Mühendislik fakültesi binasının enerji açısından düzenlenmiş mimari görseli

Mühendislik Fakültesi binasında daha fazla enerji üretilebilme potansiyelini göstermek için bir dize çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar; ön kısımda bulunun iki adet havalandırma ve baca çıkışlarının kuzey uca taşınması ve çatı katta çevrili olan duvar yüksekliğinin yarıya indirilerek daha az gölge oluşmasının sağlanmasıdır. Böylelikle çatı zemininde meydana gelebilecek gölgelemeler olabildiğince ortadan kaldırılmıştır. Şekil 5 enerji

açısında yapılmış olan basit değişikliklerin gösterildiği çizimi ve bu haliyle kurulabilecek panel yerleşimini göstermektedir. Şekil 3'teki haliyle karşılaştırıldığında çok daha fazla panelin çatı zeminine montajının yapılabileceği görülmektedir [24]. Şekil 5'te görüldüğü gibi binanın güney tarafından herhangi bir engel olmadığından panel yerleşimi için uygun bir zemin oluşturulmuştur. Zemin uygun olduğundan çeşitli açılarda panel yerleşimi mümkün olmaktadır. Şekil 6 farklı açılarla yerleşimi yapılan panellerin Mühendislik Fakültesinden üretebileceği enerji miktarlarını yıllık olarak göstermektedir. Paneller (933 adet 267W'lık PV panel) tamamen zemine yerleştirildiğinde (0° eğim açısıyla) maksimum oranda enerji (250MWh) üretildiği görülmektedir. Bu değer her ne kadar yüksek olsa da çatıda veya panellerde yapılması gereken bakım onarım faaliyetleri için uygun bir yerleşim olmayıp uygulanması mümkün değildir. Bakım onarıma ve hava sirkülasyonuna müsaade edebilecek panel yerleşimi açılı olup gölgeleme durumuna göre diziler arasında belirli bir mesafenin olduğu yerleşim şeklidir. Mesafelerden dolayı da kurulabilecek panel sayısı tamamen yatay duruma göre daha az olmaktadır.

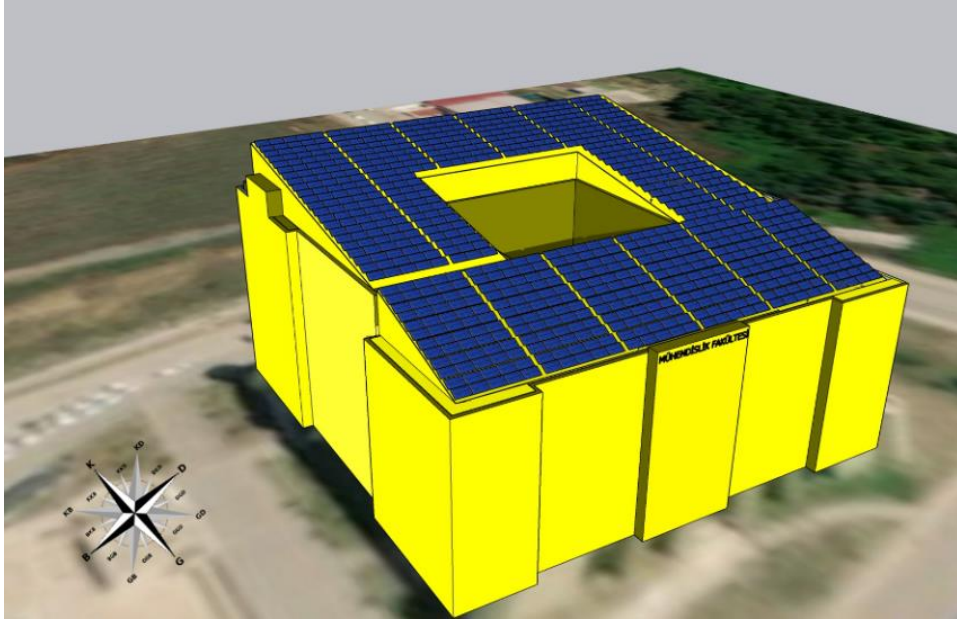


Şekil 6. Farklı panel açılarıyla mühendislik fakültesinin iyileştirilmiş durumu (gölgelemeden dolayı panel açısına bağlı olarak kullanılan panel sayısı da değişiklik göstermiştir)

Eğimli kurulum ile kullanılan panel sayısı 19° , 21° ve 29° de sırasıyla 534, 509 ve 437 adettir. Yıl boyunca üretilen enerji 19° , 21° ve 29° açılarda sırasıyla 157 MWh, 151 MWh ve 131 MWh olarak bulunmuştur. Mühendislik fakültesi binasının daha fazla enerji potansiyeline sahip olması için yapılan iyileştirmelerin yanı sıra artan panel sayısı ile birlikte panel açılarının farklı olması üretilen enerjinin değişmesine yol açmaktadır. Mimari açıdan bir iyileştirme olmadan önce üretilen enerji miktarı 86 MWh/yıl iken basit mimari düzenlemelerle ve bakım onarıma müsaade edecek şekilde kurulan santralle (19° eğim açılı) 157 MWh/yıl'lık enerji üretimi gerçekleştirilebilecektir. İki durum karşılaştırıldığında üretilen enerji miktarında %82,5 (71 MWh) oranında artış olduğu ve sadece bu artış miktarı ile binanın neredeyse iki aylık enerji ihtiyacının tamamen karşılanacağı sonucu ortaya çıkmaktadır. Yapılan ölçümlere göre Mühendislik Fakültesi binasındaki enerji tüketimi; hafta içi 1600 kWh/gün, hafta sonu ise 600 kWh/gün'dür. Aylara göre enerji üretim profili Şekil 4'teki gibidir. Üretimin en fazla (Temmuz) ve en az (Aralık) olduğu aylar bir önceki durumda olduğu gibidir.

Buraya kadar yapılan mimari değişiklikler basit unsurları içermektedir. Çizimlerden ve uydu resminden de görüldüğü gibi mühendislik fakültesi binası açık çatı planına sahiptir. Bu kısımda yapmayı planladığımız değişiklik ise açık çatı modeli yerine eğimli çatı (sundurma çatı) modelini benimsemektir. Binanın ön ve arka cephesi kuzey ve güneye baktığından uygun çatı eğimiyle ve güney cepheye bakacak şekilde bir çatı düzenlemesi yapılabilir. Yapılan bu değişiklik ile eğimli çatı altında ofislerin olması sağlanabilirken çatı üzerinde de doğrudan panel kurulumuna izin verilecektir. Bu tasarımda panellerin konstrüksiyon kullanılmadan direkt olarak eğimli çatı zeminine yerleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu tasarımla daha fazla enerji üretilmesi, konstrüksiyon maliyetinin

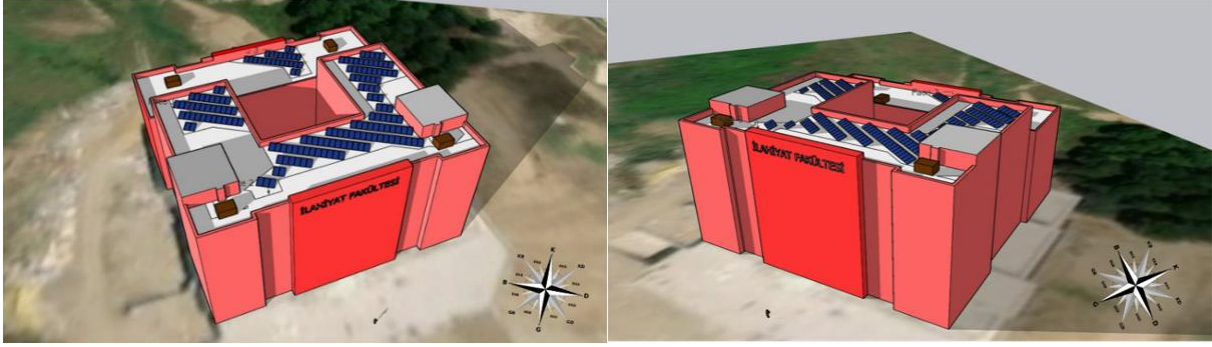
düşmesi, yeni ofis alanlarının açılması ve açık çatıdaki su akma gibi problemlerin giderilmesine de olanak sağlanmış olacaktır.



Şekil 7. Mühendislik fakültesi binasının eğimli çatı modeli ve panel kurulum görseli

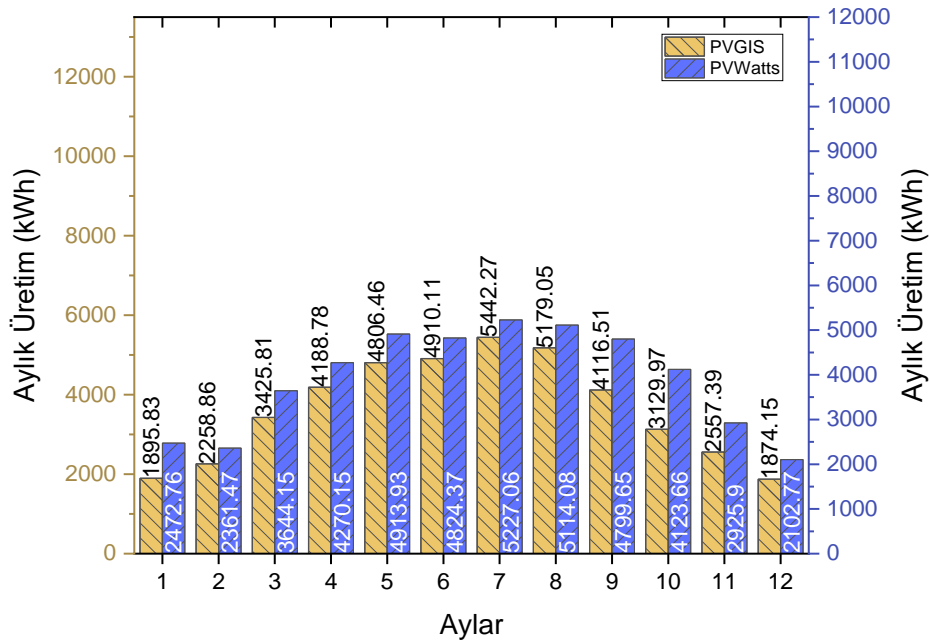
PVGIS ile yapılan hesaplamalarda en verimli panel açısının 31° olduğu saptanmıştır. Ancak çatının 31° eğime sahip olması için kuzey cephedeki duvar yüksekliğinin neredeyse bina yüksekliği kadar olması gerekmektedir. Bu da mimari açıdan uygulanabilir bir değişiklik değildir. Şekil 7’de görüldüğü gibi kuzey cephedeki duvar yüksekliği makul seviyede tutularak daha yatay ve uygulanabilir bir çatı elde edilmiştir. Çatıya bakıldığında iki grup halinde olduğu görülmektedir. Daha dik ve güneyde kalan kısım mevcut yükselteli çatının yüksekliğine bağlı olarak yapılmıştır. Çatılı tasarım ile mühendislik fakültesi adeta bir enerji üretim santrali görüntüsüne bürünmüş ve 300 MWh/yıl’lık enerji üretim potansiyeline sahip olduğu yapılan simülasyonlarla ortaya konmuştur. Elde edilebilecek bu enerji miktarı ilk duruma (mevcut mimari plan) göre 3,5 kat (214 MWh) daha fazla olup Mühendislik Fakültesinin fazladan altı aylık enerji ihtiyacını sağlayacak büyüklüktedir. Çatılı durumda üretilen enerji binanın mevcut yıllık enerji tüketiminin %60-65 oranında karşılanmasını sağlayabilmektedir. Her ne kadar yapılması mümkün olmasa da yapılan simülasyonlar 31° ’lik eğime sahip bir çatının yapılması durumunda direkt çatı üzerine kurulacak panellerle üretilen enerji yaklaşık 355 MWh/yıl olduğu ortaya konmuştur.

Yalova Üniversitesi merkez kampüste bulunan iktisadi ve idari bilimler fakültesi, hukuk fakültesi ve rektörlük binalarının mimarisi mühendislik fakültesine benzediğinden bu binalardaki mimari tasarım ile meydana gelen değişikliklerden bahsedilmemektedir. Ancak, mühendislik fakültesinden elde edilen artış oranlarının yaklaşık olarak bu binalardan elde edilebileceği ortaya konmuştur. Merkez kampüste bulunana bir diğer inceleme yapılacak olan bina ise islami ilimler fakültesidir. Şekil 8 mevcut fakültenin 3D modelini mimari özelliklere ve binadaki gölge unsurlarına dokunmadan göstermektedir. Önceki paragraflarda bahsedildiği üzere mühendislik fakültesinin açık çatı olduğu ve bu çatının kademeli bir şekilde ve kademe basamaklarının kuzey cepheye doğru arttığı ve bundan dolayı güney kesimde kalan kısmın kuzeyde kalana herhangi bir gölge oluşturmayıp panel kurulumu için uygun olduğu bahsedilmişti. Ancak mevcut islami ilimler fakültesine bakıldığında binanın ön ve arka cephelerinin yine kuzey batı ve güney doğu yönüne baktığı ancak açık çatı modelindeki kademe artışlarının kuzeyden güneye doğru olduğu görülmektedir. Bu da en güney cephede kalan tarafın en yüksek olduğunu ortaya koymakta, kuzey yönde ve alçakta kalan çatı bölgelerine güney yöndeki yükseltinin gölge oluşturacağını göstermektedir. Yapılan simülasyonlar sonucunda çatıdaki unsurların ve çatı yapısının çatı yüzey alanında yaptığı gölge miktarının ne kadar çok olduğu Şekil 8’de ortaya konmaktadır. Gölge kısımlarda verimli enerji üretimi olmayacağından bu alanlara panel kurulumu fizibil değildir ve bundan dolayı benzetim programı panel yerleşimi yapmamaktadır. Binanın mimari planı solar enerji bakımından tamamen yanlış olup mevcut durumdaki panel yerleşimi (146 adet 230W) ile 43,9 MWh/yıl’lık enerji üretimi gerçekleştirilmektedir.



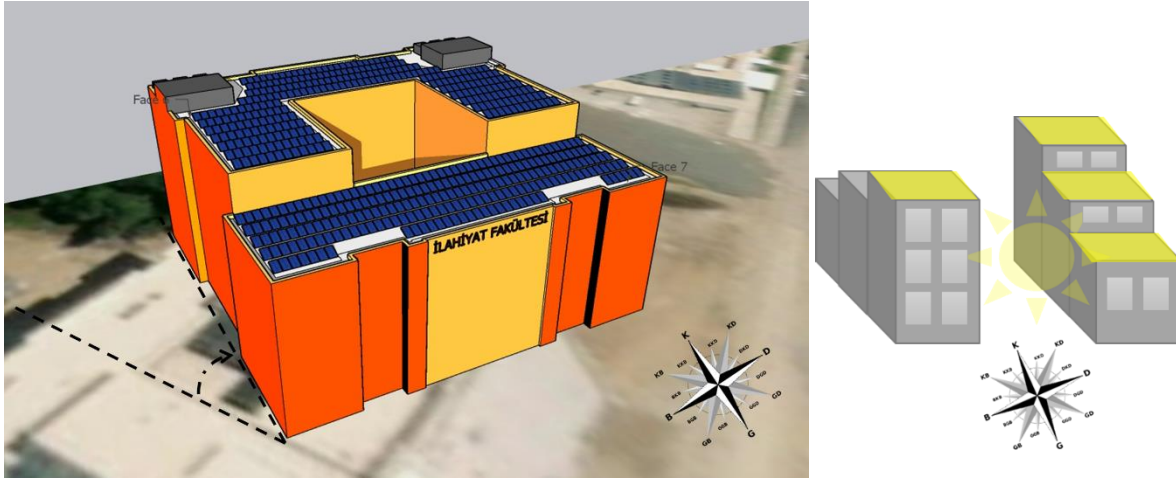
Şekil 8. İslami ilimler fakültesinin mevcut tasarımına ait çatı üzeri güneş panelli 3D çizim ve gölgeleme görseli

İslami ilimler fakültesinin mevcut durumda aylara göre üretebileceği enerji miktarı iki farklı benzetim programına göre Şekil 9’da gösterilmiştir. Diğer binalarda olduğu gibi burada da en fazla üretim temmuz ayında olurken en az üretim aralık ayında gerçekleşmiş ve ikisi arasında 2,9 katlık bir fark söz konusudur. PVGIS ile yapılan çalışmada yıllık enerji üretimi 43,9 MWh çıkmışken PVWatts ile yapılan çalışmada 46,8 MWh çıkmıştır. İki değer birbirine yakın değerler olup binanın mevcut halinin üretim potansiyelinin 44-47 MWh/yıl olduğunu ortaya koymaktadır.

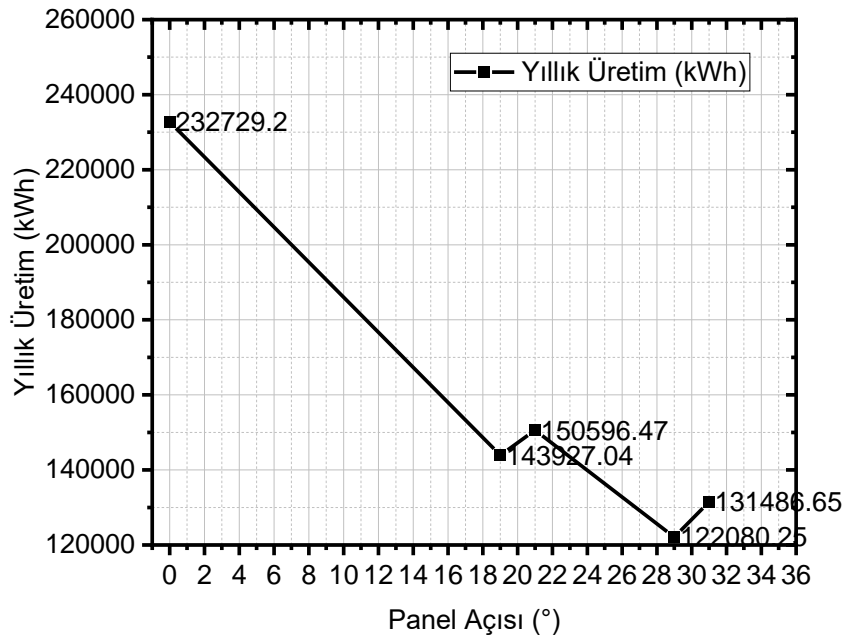


Şekil 9. Aylara göre İslami ilimler fakültesinde mevcut durumda üretililecek enerji miktarlarının karşılaştırması

İslami ilimler fakültesinin mimari açıdan iyileştirilmiş hali Şekil 10’da gösterilmektedir. Binada yapılması gerekenler sırasıyla binanın yönünün kuzey batı ve güney doğu değil de kuzey ve güneye bakması, çatının kat yüksekliğinin kuzeyden güneye değil de güneyden kuzeye doğru artması sağlanmalıdır. Bu şekilde binanın çatısına kurulabilecek olan PV panellerle üretilen enerji miktarında artış olacaktır. Binanın yönünün kuzey ve güney olması panel kurulumu esnasında azimut açısına ihtiyaç duyulmamasına ve bu şekilde daha fazla panel yerleşimi ile üretililecek enerjinin artmasına neden olmaktadır. Çatının yükselme yönü ise mühendislik fakültesindeki tasarım gibi olmalı ki güney yönde kalan duvarların gölgesinin kuzeydekilerin üzerine düşmesi engellensin ve maksimum oranda güneş enerjisinden yararlanılsın. Yapılacak olan diğer mimari değişiklikler ise çatı kenar duvarlarının yüksekliğini yarıya düşürmek ve güney cephede kalan baca, boru ve havalandırma gibi yerlerin kuzey cepheye alınmasını sağlamaktır.

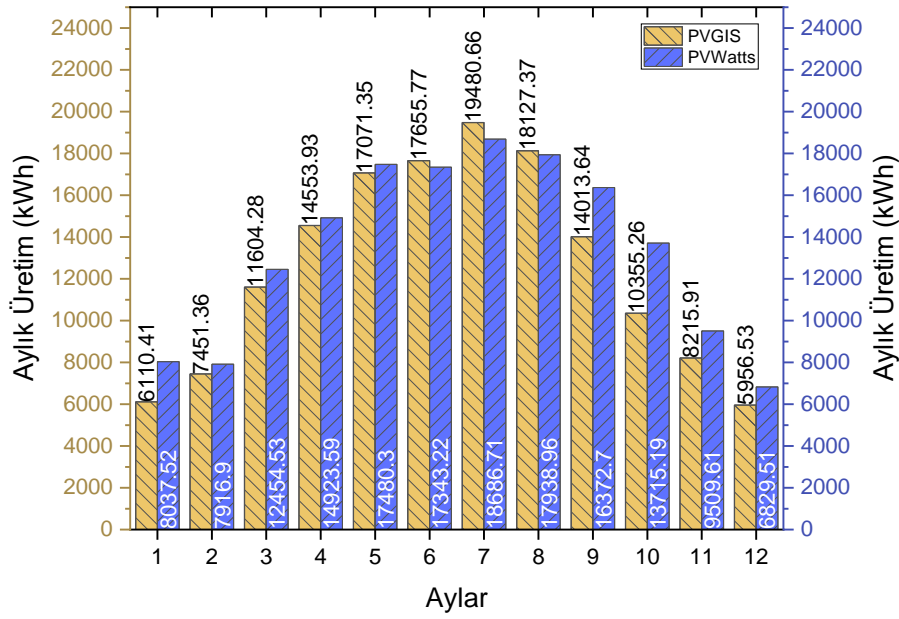


Şekil 10. İslami ilimler fakülte binasının enerji açısından düzenlenmiş mimari görseli ve farklı yönde çatı yüksekliğine sahip binaların güneşlenme gösterimleri (sol şekildeki kesikli çizgiler binanın optimum enerji üretimi için panel yönlerinin tam olarak güneye bakmasını sağlayabilecek gerekli açısız değişikliği göstermektedir)



Şekil 11. Farklı panel açılarıyla İslami ilimler fakülte binasının iyileştirilmiş durumu (gölgelemeden dolayı panel açısına bağlı olarak kullanılan panel sayısı da değişiklik göstermiştir)

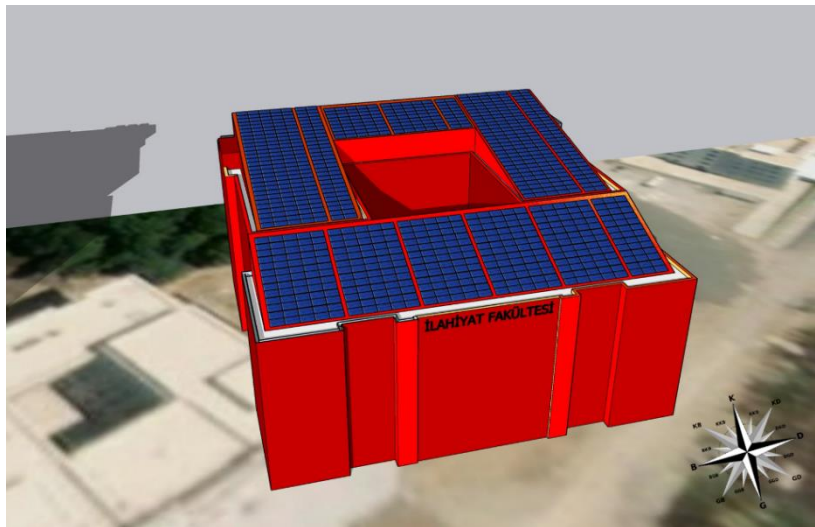
İslami İlimler Fakültesinin güneş enerji potansiyelini arttırmak için bina mimarisinde yapılan değişiklikler sonucunda üretilen yıllık enerji miktarları panel kurulum açılarına bağlı olarak Şekil 11'de görülmektedir. Çatı zeminine herhangi bir eğim açısı olmadan kurulum yapıldığında 870 adet 230 W'lık panelin kurulması sağlanmış olup 232,7 MWh/yıl'lık enerji üreteceği bulunmuştur. Ancak; mühendislik fakültesi binasında da yaptığımız yorum her hâlükârda geçerli olup bakım onarım için gerekli mesafelerin gelmesi olmazsa olmazlar arasındadır. Dolayısıyla panel kurulumu açılı olarak olmalı ve diziler arasında bakım onarıma izin verecek mesafeler olmalıdır. İlgili binadaki en uygun eğim açısının bulunması için dört farklı eğim değerine sahip kurulum gerçekleştirilmiş ve Şekil 11'de bu panellerden üretilebilecek yıllık enerji miktarı gösterilmiştir. 19°'lik eğim açısı 488 panel adedi ile 144 MWh/yıl (488 panel), 21°'lik eğim açısı 508 panel adedi ile 150,5 MWh/yıl ve 29°'lik eğim açısı 407 panel adedi ile 122 MWh/yıl'lık enerji üretimine imkân sağlamaktadır.



Şekil 12. İyileştirilmiş durumdaki İslami ilimler fakülte binasında 21° panel açısıyla kurulmuş enerji santralinden aylara göre elde edilebilecek üretim değerlerinin iki farklı benzetim programına göre karşılaştırılması

Görüldüğü gibi mevcut bina için en uygun açının 21° olduğu ortaya konmuş ve bu haliyle elde edilebilecek enerji miktarının mevcut mimari tasarımda elde edilebilecek enerjiye göre 3,42 katı olacağı bulunmuştur. İnşaat maliyetinde herhangi bir değişikliğe yol açmadan sadece mimari planda ve konumda yapılan bu değişikliklerin solar enerjiden daha fazla yararlanılmasına ve 106,6 MWh/yıl'lık daha fazla enerjinin üretilmesine neden olmaktadır. Sadece solar mimariye dikkat ederek, ekstra maliyete gerek kalmadan 64 ton'luk CO₂'nin atmosfere salınımının önüne geçilmiş olacaktır.

Mühendislik fakültesinde olduğu gibi, İslami ilimler fakültesinde de ekstra maliyet ile eğimli çatı yapılması mümkündür. Bu hem daha fazla panel kurulumu ile yüksek elektrik enerjisi üretimine izin verecek hem de çatı altında personel için ofis alanlarının açılması sağlanabilecektir.



Şekil 13. İslami ilimler fakülte binası eğimli çatı modeli ve panel kurulum görseli

İslami ilimler fakülte binası için tasarlanan başka bir model ise çatılı halidir. Bu tasarımda panellerin konstrüksiyon kullanılmadan direkt olarak yüzeye montajı amaçlanmıştır. Şekil 13 binanın çatılı halini göstermekte olup panel kurulumu direkt olarak çatı zeminine yapılmıştır. Çatı mevcut duvar yüksekliğinde oluşan açığa göre tasarlanmıştır. Güney cephede kalan kısmın açısı 16,89° olup kuzeye bakan ikinci bölgenin eğim açısı ise 21,97°'dir. Çatılı haliyle ve tüm yüzeye panel yerleşimi yapılması suretiyle elde edilebilecek enerji değeri 304 MWh/yıl olarak bulunmuştur. Binanın mevcut ve kullanımda olan hali 43,9 MWh/yıl'lık enerji üretim potansiyeline sahipken basit değişikliklerle üretim potansiyeli 150,5 MWh/yıl'a ve eğimli çatı tasarımı ile 304 MWh/yıl'lık enerji üretilbileceği bulunmuştur. İlk durum ile son durum arasında neredeyse yedi kat fark olup 260 MWh'lik fazladan enerji üretimi sağlanmış olacaktır (43,9 MWh→150,5 MWh→ 304 MWh). Türkiye'de dört kişilik bir ailenin yıllık enerji tüketiminin 3000 kWh olduğu düşünülürse, fazladan üretilebilecek olan bu değer yaklaşık 87 hanenin bir yıllık enerji ihtiyacını karşılayabilecek büyüklüktedir.

Önceki paragraflarda belirtildiği gibi çalışma ağırlıklı olarak kampüs içerisindeki mühendislik ve islami ilimler fakülte binaları üzerinden yapılırsa da Yalova ilindeki birçok kamu binasının mevcut ve solar enerji için optimize edilmiş halleri de çizilmiş ve gerekli simülasyonlar yapılarak enerji üretim potansiyelleri karşılaştırılmıştır.

Herhangi bir değişiklik yapmadan belediye binası, devlet hastanesi, il emniyet müdürlüğü, belediye otoparkı ve valilik binasına montajı yapılabilecek 230W'lık panel sayısı sırasıyla 156, 478, 72, 531 ve 139'dur. Yapılan basit değişiklikler daha öncesinde bahsedildiği gibi çatı kenar duvar yüksekliğinin azaltılması, baca havalandırma unsurlarının binanın kuzey tarafına alınması ve bazı binalarda uygun olmayan eğimli çatının kaldırılması olmuştur. Şekil 14 binaların mevcut ve solar mimari açısından optimize edilmiş hallerindeki durumu ve kurulabilecek fotovoltaik panel yerleşimini göstermektedir. Her ne kadar kampüs içerisinde incelenen binalarda eğimli çatı eklenmesiyle üretilebilecek enerji miktarının önemli oranda artacağı belirtilmiş olsa da her bina kendi özelinde incelenmelidir. Yalova il emniyet müdürlüğüne ait bina eğimli bir çatıya ve uygun bir yöne sahip olsa da çatının yapısı gereği yüksek enerji üretimine izin vermemektedir. Bu gibi durumlarda kırma çatı yerine beşik çatı veya açık çatı modeli kullanılmalıdır.

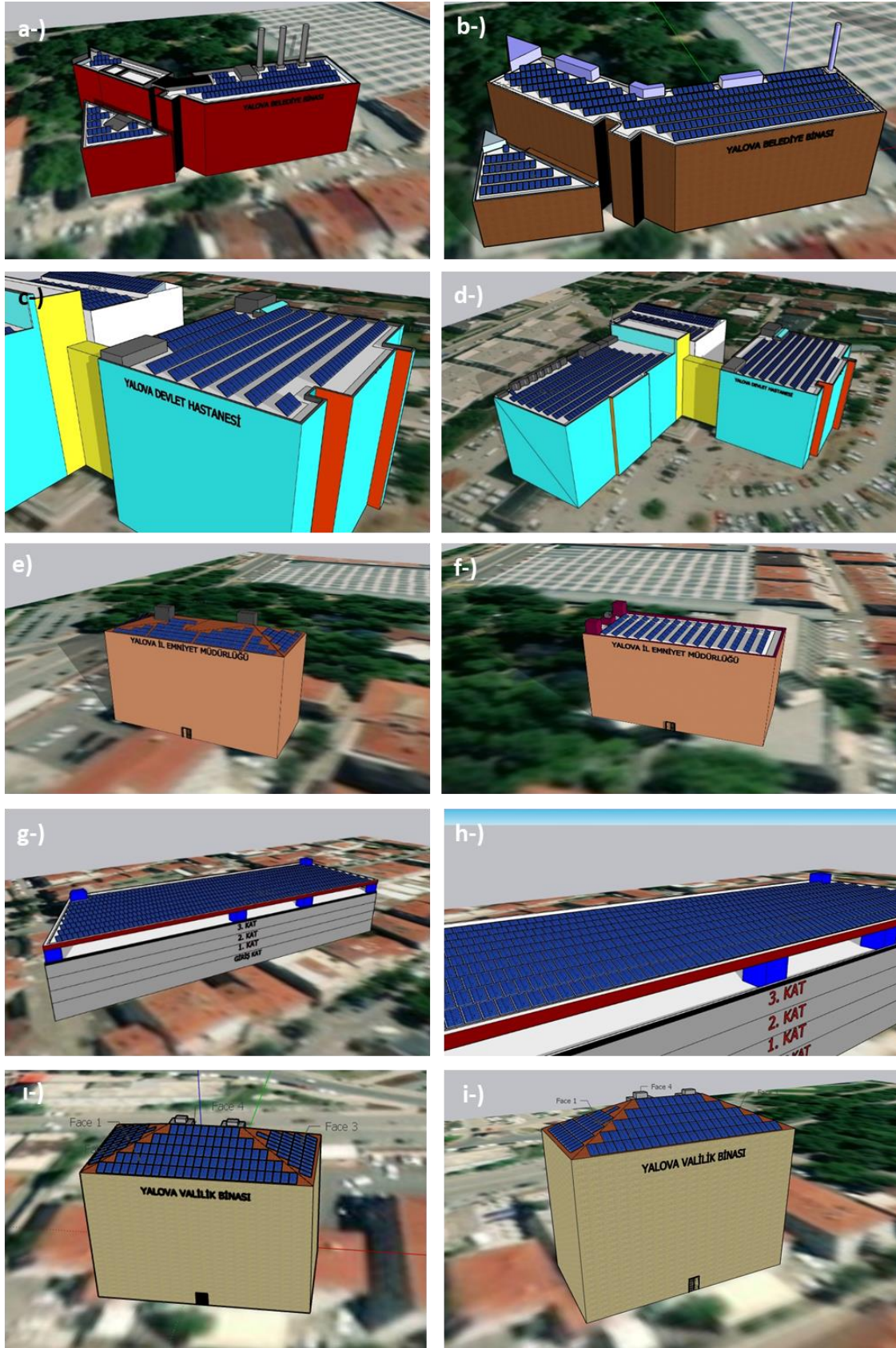
Tablo 2. Kamu binalarının mevcut ve iyileştirilmiş durumdaki farklı panel eğim açılarıyla elde edilmiş yıllık enerji üretim değerleri ve kullanılan panel sayıları (*bakım-onarım açısından mümkün olmayan durum)

	Mevcut Durum		İyileştirilmiş Durum										Geliştirme Çarpanı	
	Panel sayısı	Yıllık üretim (kWh)	0° panel açısı		19° panel açısı		21° panel açısı		29° panel açısı		31° panel açısı			
			Panel sayısı	Yıllık üretim (kWh)	Panel sayısı	Yıllık üretim (kWh)	Panel sayısı	Yıllık üretim (kWh)	Panel sayısı	Yıllık üretim (kWh)	Panel sayısı	Yıllık üretim (kWh)	Panel sayısı	Yıllık üretim (kWh)
Devlet Hastanesi	478	143.207,91	-	-	809	235.094,3	828	240.763,7	713	208.071,8	697	203.045,7	1,68	
Belediye Binası	156	47.254,63	-	-	344	102.432,7	-	-	354	126.566,4	286	86.710,2	2,67	
İl Emniyet Müdürlüğü	72	24.682,95	165	44.541,7	98	29.176,4	92	27.532,1	88	26.650,9	80	34.320	1,8*	
Belediye Otoparkı	531	167.476,55	-	-	774	230.382	731	218.704,8	636	192.541,36	689	280.760,6	1,68	
Valilik Binası	139	39.452,68	-	-	-	-	193	51.023,7	139	29.205,4	140	29.205,4	1,29	

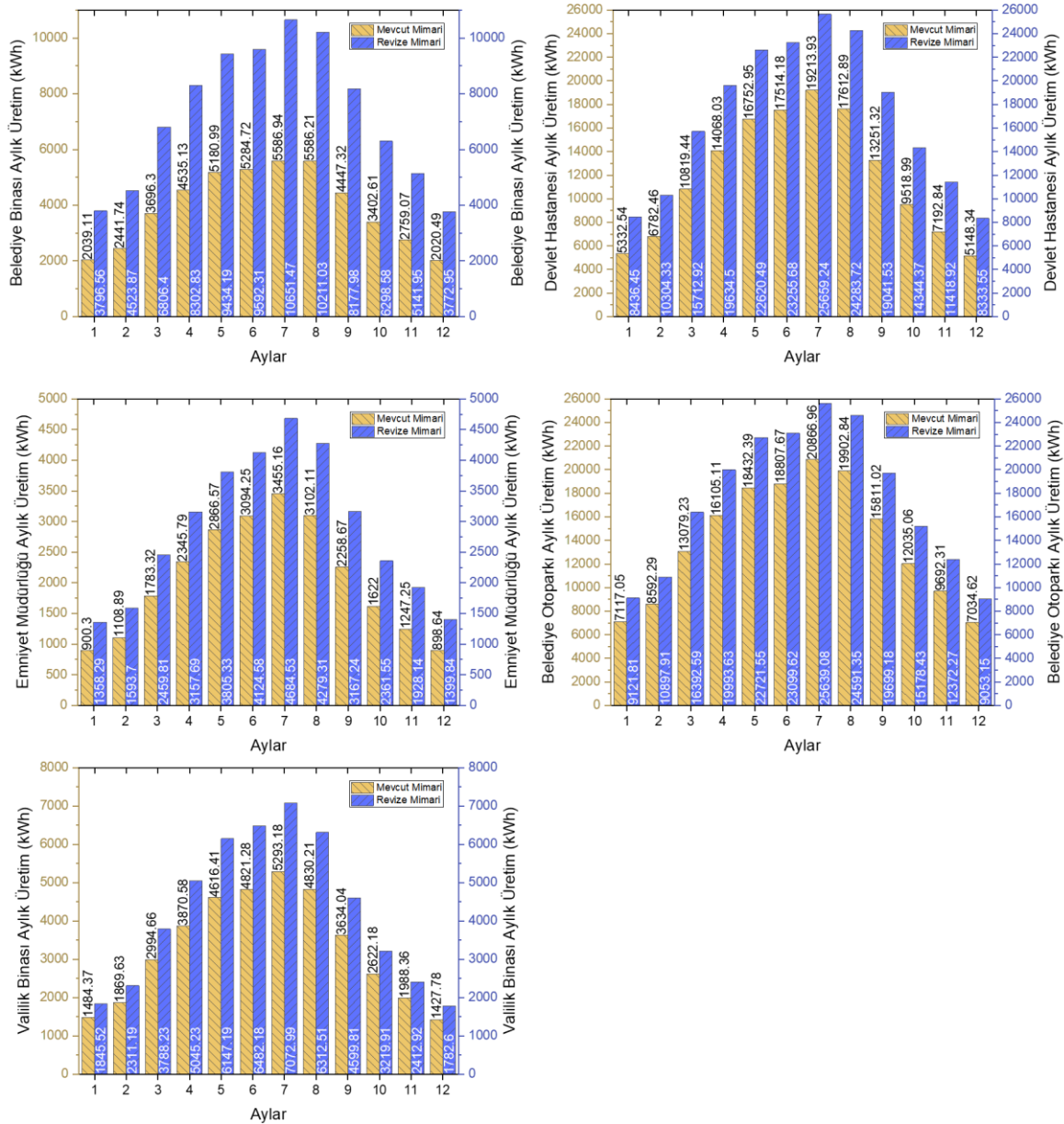
Tablo 2 diğer kamu binalarının mevcut ve iyileştirilmiş durumdaki farklı panel açılarıyla elde edilebilecek yıllık enerji miktarını göstermektedir. Görüleceği üzere basit mimari plan değişiklikleri ile enerji üretim potansiyeli tüm binalar için ortalama %70 oranında artarak mevcut duruma göre 1,5-2,5 katı oranlarda enerji üretilmesi sağlanmaktadır. Şekil 15 bu binaların mevcut ve geliştirilmiş hallerinin aylara göre üretilen enerji değerlerini göstermektedir. Enerji üretim farklılığının en fazla olduğu aylar yaz aylarında olmakla birlikte kış aylarına doğru düştüğü ve kış aylarından yaz aylarına doğru gittikçe arttığı görülmektedir. Basit dokunuşlarla meydana gelen elektrik enerjisi üretim artışı ile tonlarca CO₂'nin doğaya salınmasının önüne geçilmiş ve milli sermayenin ülkemizde kalması sağlanmış olacaktır.

Şekil 16'ya bakıldığında Yalova ili sınırları içerisinde yer alan birçok kamu binasının çatı üzeri güneş enerji santrali ile üretilen enerji miktarları görülmektedir. Kampüs içerisinde yer alan binaların iki farklı revize planı yapılmış olup 1. Mimari revizyon tüm binalar için

sadece basit ve bina yapımı esnasında ekstra maliyet gerektirmeyen değişiklikleri içerirken 2. Mimari revizyon planı ekstra bütçeye ihtiyaç duyulan eğimli çatı kurulumunu içermektedir.

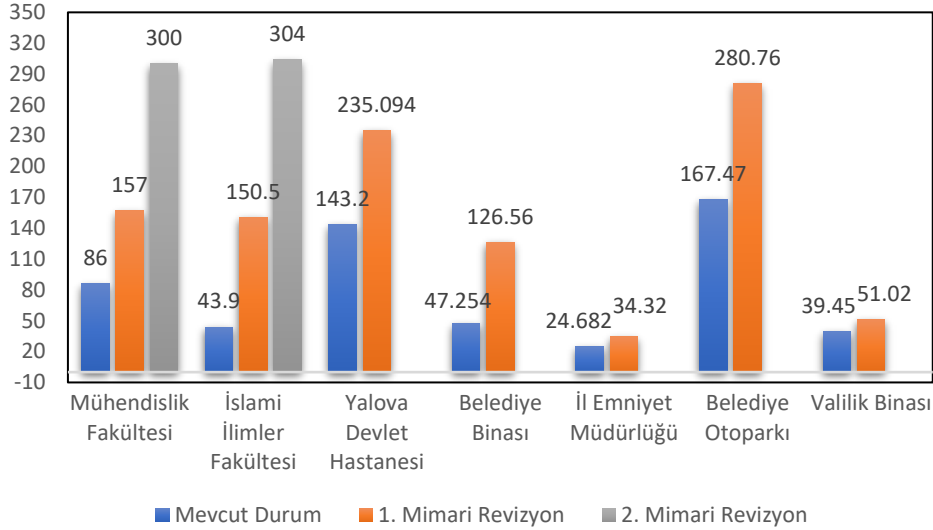


Şekil 14. Farklı kamu binalarının mevcut ve optimize edilmiş mimariye sahip panel yerleşimli 3D görselleri (belediye otoparkı ve valilik binasındaki değişim sadece gölge unsurlarının kuzey yöne alınmasıdır)



Şekil 15. Mevcut ve iyileştirilmiş durumdaki kamu binalarının aylara göre enerji üretim miktarları.

Grafik incelendiğinde binalardaki enerji artış oranlarının mühendislik fakültesi, islami ilimler fakültesi, devlet hastanesi, belediye, il emniyet müdürlüğü, belediye otoparkı ve valilik binalarında yüzde olarak sırasıyla 82,55 (248,83) / 242,82 (592,48) / 64,17 / 167,82 / 39,04 / 67,64 ve 29,32 olduğu bulunmuştur. Parantez içindeki ifadeler 2. Mimari revizyon planı ile gerçekleşen artış oranını vermektedir. Elde edilen bu sonuçlardan güneş enerji potansiyelinden yararlanma açısından mimari tasarımı uygun olmayan binanın islami ilimler fakültesi başta olmak üzere Yalova belediye binası olduğu ortaya konmuştur. Mimari açıdan güneş enerjisinden maksimum oranda yararlanabilecek binaların ise valilik ve il emniyet müdürlüğü binaları olduğu ortaya konmuştur. Ancak bu binalarda dahi yapılabilecek mimari dokunuşlarla %30-40 aralığında daha fazla güneş enerjisinden elektrik elde edilmesi mümkün olabilmektedir.



Şekil 16. Kamu binalarının mevcut ve çeşitli mimari revizyonlar sonrası çatı üzeri kurulu enerji santrali ile yıllık üretebileceği elektrik enerji değerlerinin karşılaştırılması (MWh)

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Fotovoltaik hücreler yüksek enerji üretim potansiyeline sahip olmasına rağmen büyük bir alana ihtiyaç duyduğundan uygulama konusunda bazı sıkıntılar doğurmaktadır. Binalarda hali hazırda bulunan çatı yüzeyleri fotovoltaik panel kurulumu için uygun olup günden güne çatı üzeri panel kurulumu artmaktadır. Bu çalışmada gösterildiği gibi tasarlanan binaların birçoğu solar mimari açısından irdelenmemiş ve potansiyelinin çok altında enerji üretim kapasitesine sahiptir. Bu çalışmada Yalova'daki bazı kamu binalarının güneş enerji potansiyellerini analiz etmek için çeşitli çizim ve benzetim programları kullanılmış ve binaların mevcut ve geliştirilmiş mimarili halleriyle üretilebilecek elektrik enerji potansiyeli ortaya konmuştur. Yapılan mimari tasarım değişiklikleri iki gruba ayrılmış ve incelenmiştir. Birinci grup yapım esnasında mevcut haline göre ekstra yatırım maliyetine gerek kalmadan yapılacak basit değişiklikleri içerirken, ikinci grup eğimli çatı kurulumu için ekstra yatırım maliyeti gerektiren değişiklikleri içermektedir. Her iki durum da mevcut duruma göre elektrik enerji üretimini büyük oranda arttırmıştır. Basit değişikliklerle modifiye edilen mimari planın enerji üretim potansiyelini %242,82, eğimli çatı inşası ile elde edilebilecek enerji potansiyelinin ise %592,48'e kadar arttırdığı yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. Yapılan bu değişikliklerle yüzlerce ton CO₂ ve diğer zararlı gazların atmosfere salınması önlenmiş ve katkı sağlanan enerjiyle yüzlerce hanenin yıllık enerji ihtiyaçlarını karşılayacak miktarda enerji üretilmiştir. Basit ama dikkate alındığında ne kadar etkili olduğu gösterilen bu mimari yaklaşımlarla milli sermayenin ülkede kalması ve enerji bağımsızlığı için katkıda bulunulması sağlanmıştır. Bu çalışma birçok alanda mimari planların solar enerji göz önünde bulundurularak hazırlanmasını sağlayacak ve bu şekilde enerji konusunda bağımsız bir ülke olma yolunda katkı sağlayacaktır.

TEŞEKKÜRLER

Yapmış olduğum bitirme projemde, yanımda olan ve desteğini hiç eksik etmeyen, projeye ve makaleye yeni bir boyut kazandıran değerli hocam Doç. Dr. Sunay Türkdoğan'a teşekkürü borç bilirim.

KAYNAKLAR

- [1] Kefif N, Melzi B, Hashemian M, Assad MEH, Hoseinzadeh S (2022) Feasibility and optimal operation of micro energy hybrid system (hydro/wind) in the rural valley region. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 17: 58-68.
- [2] Dikmen Ç, Gültekin A (2011) Usage of renewable energy resources in buildings in the context of sustainability. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 1(3):96-100.
- [3] Kalogirou SA (2015) Building integration of solar renewable energy systems towards zero or nearly zero energy buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 10(4):379-385.
- [4] Kılıç MY, Dönmez T, Adalı S (2021) Bursa ve Karaman illerinde konutlarda güneş enerji potansiyelinin uygulanabilirliğinin araştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 26(2):421-432.
- [5] Kaynar NK (2020) Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin Amasya ilindeki potansiyeli. *Bilge International Journal of Science and Technology Research* 4(2):48-54.
- [6] International Energy Agency, Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO₂ emissions in 2021, Paris: International Energy, 2021.
- [7] TEİAŞ, 2022 yılı aylık elektrik üretim tüketim raporları, istanbul: TEİAŞ, 2022.
- [8] Kadırgan P (2010) Binalarda güneş enerjisi uygulamaları p. 19
- [9] Wall M, Probst MCM, Roecker C, Dubois MC, Horvat M, Jørgensen OB, Kappel K (2012) Achieving solar energy in architecture-IEA SHC Task 41. *Energy Procedia* 30:1250-1260.
- [10] Baldwin E (2021) Solar design: how architecture and energy come together. *ArchDaily*.
- [11] Aksungur KM, Kurban M, Filik ÜB (2013) Türkiye'nin farklı bölgelerindeki güneş ışınım verilerinin analizi ve değerlendirilmesi. *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Eskişehir*, 3-6.
- [12] Türe PE (2008) Çatı malzemesi olarak güneş enerjisi sistemleri, 4. Ulusal Çatı ve Cephe Kaplamalı Çağdaş Malzeme Ve Teknolojiler , İstanbul, 2008.
- [13] ÇİFCİ A, ALTUNDAĞ E (2017) Burdur bölgesi güneş enerjisi potansiyelinin elektrik üretiminde kullanılabilirliği. *Mesleki Bilimler Dergisi (MBD)* 6(2):111-120.
- [14] Konu: Resmi İstatistikler, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?> Erişim Tarihi: 10.02.2021.: T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü,, 2021.
- [15] Kanters J, Wall M, Dubois MC (2014) Typical values for active solar energy in urban planning. *Energy Procedia* 48:1607-1616.

- [16] Kim SY, Choi HS, Eum JH (2018) Energy-independent architectural models for residential complex plans through solar energy in Daegu Metropolitan City, South Korea. *Sustainability*, 10(2): 482.
- [17] Tzivanidis C, Bellos E (2018) Solar energy utilization in buildings. *Recent Advances in Renewable Energy* 3:119-165.
- [18] Chel A, Kaushik G (2018) Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. *Alexandria engineering journal*, 57:655-669.
- [19] Sayın S, İlhan KOÇ (2011) Güneş enerjisinden aktif olarak yararlanmada kullanılan fotovoltaik (PV) sistemler ve yapılarda kullanım biçimleri. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi* 26(3):89-106.
- [20] Yılmaz Z (2006) Akıllı binalar ve yenilenebilir enerji. *Tesisat Mühendisliği Dergisi* 91(7):15.
- [21] Satpathy PR, Sharma R, Panda S (2021) January. Optimal Sizing, Placement and Shading Analysis of a 19.2 kW Grid-Tied Residential Roof-Top PV System. In *2021 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology (ODICON)* (pp. 1-6). IEEE.
- [22] W.Paul: NASA surface meteorology and solar energy database, 2011.
- [23] Ayadi O, Al-Dahidi S (2019) Comparison of solar thermal and solar electric space heating and cooling systems for buildings in different climatic regions. *Solar Energy* 188:545-560.
- [24] Urcelay AD, Estimation of the photovoltaic potential integrated in buildings in the facilities of the Naval Military School, University Defense Center at the Naval Military School, Spain, 2015-2016.



Derleme Makalesi

Journal of Innovative Engineering and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

journal homepage: <https://jiens.org>

Alev geciktirici polimerlerin sentezine yönelik güncel yaklaşımlar

 Neşe Çakır Yiğit^{1,*}
¹Department of Polymer Materials Engineering, Faculty of Engineering, Yalova University, Yalova, 77200, Turkey

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 29 Haziran 2022

Düzeltilme 18 Temmuz 2022

Kabul 27 Temmuz 2022

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Yanmazlık

Alev geciktirici katkı

Fosfor

Yanmaz polimer

ÖZET

Günümüzde polimerik malzemeler kolay işlenebilmeleri ve düşük ağırlıklı yapıları nedeniyle her alanda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, hidrokarbon esaslı olduklarından dolayı yanıcıdır, çoğu zaman zehirli gaz üretirler. Polimer sektöründe, alev geciktirici polimer malzemelerin gelişimi polimerlerin kullanılmalarının artırılması için büyük bir öneme sahiptir. Bu derleme, alev geciktirici polimer malzemelerin bilgi ve teknolojisindeki son gelişmeleri incelemeye, sınıflandırmaya ve alev geciktirici özellikleri üzerinde gerçekleştirilen kalitatif ve kantitatif analizleri göstermeye odaklanmaktadır. Ayrıca, alev geciktirici katkı maddesi olarak halojenlerin yerini tutan fosfor ve azot elementlerine ilave olarak hidroksit içerikli inorganik alev geciktiriciler açıklanmaktadır. Son olarak, alev geciktirici katkı maddelerinin zamanla ortamdan salınması nedeniyle polimer matrisi ile homojen olarak karışabilirliği sınırlı olduğundan ve mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkisinden dolayı yeni bir strateji olan “yanmaz polimerler” konusuna değinmektedir.

2022 JIENS Tüm hakları saklıdır.

Current approaches to the synthesis of flame retardant polymers

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 June 2022

Received in revised form 18 July 2022

Accepted 27 July 2022

Available online

Keywords:

Non-flammability

Flame retardant additive

Phosphorus

Anti-flammable polymer

ABSTRACT

Polymeric materials are used in every field due to their easy processing and low-weight structure. However, because they are hydrocarbon-based, they are flammable, often producing toxic gases. Therefore, in the polymer industry, the development of flame retardant polymer materials is of great importance to increase the use of polymers. This review focuses on reviewing and classifying the latest developments in the knowledge and technology of flame retardant polymer materials and showing the qualitative and quantitative analyzes performed on their flame retardant properties. In addition, inorganic flame retardants containing hydroxide are disclosed, in addition to phosphorus and nitrogen elements, which replace halogens as flame retardant additives. Finally, it touches on the topic of “anti-flammable polymers,” a new strategy.

2022 JIENS All rights reserved.

I. GİRİŞ

Modern yaşamımızda, polimerler, farklı çevre koşulları altında geniş kullanım alanlarına sahiptir. Neredeyse tamamı hidrokarbon esaslı olan polimerler, yanma özelliğine sahiptirler. Polimerlerin yanıcılığını ve zehirli duman üretimini azaltmak için alev geciktiricilerin kullanımı, yeni malzemelerin geliştirilmesi ve uygulanmasında önemli bir parametredir. Ülkelerin özellikle çevre şartlarını ve insan sağlığını dikkate alarak yanmazlık seviyesindeki yeni

*Sorumlu yazar. Tel.: +90-000-000-0000; e-mail: author@university.edu.tr

standartların geliştirilmesi ve bu kapsamda yeni yönetmeliklerin çıkarılması alev geciktiriciler üzerine çalışmaların artarak devam etmesine sebep olmuştur [1, 2].

Bu kapsamda, yapılan çalışmalardan en bilineni alev geciktirici katkı maddelerinin kullanımınıdır. Fosfor içerikli alev geciktiriciler yanma sırasında koruyucu kömür tabakası oluşturması ve daha az toksik olması nedeniyle, uzun zamandır halojenli alev geciktiricilerin yerine kullanılmaktadır. Ayrıca, yapıya azot içerikli alev geciktirici katkıları da eklendiğinde, azot ve fosforun sinerjik etkisiyle alev geciktiricilik artmaktadır. Bunlara ek olarak, hidroksit içeren inorganik katkı maddeleri de sıklıkla kullanılmaktadır [3-5].

Alev geciktirici katkı maddelerinin sık kullanılmasına karşın, eklendiğinde polimerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etki yapması, homojen olarak karışmaması ve zamanla polimer yapısından salınması nedeniyle alev geciktiricilik üzerinde yeni sentetik yaklaşımlar gelişmiştir [6, 7].

Bu sorunlara en önemli çözüm olarak, polimerlerin katkı maddesi konulmadan kendiliğinden alev geciktirici özellik göstermesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, polimerin kendiliğinden yanmazlık göstermesi için alev geciktirici katkı maddelerinin kovalent olarak polimer matriksine bağlanması ya da monomerlerin alev geciktirici yapıları içermesi ve polimerizasyonda kullanılması bir tercihtir. Bu yöntem, özellikle son yıllarda popüler hale gelen “yanmaz polimer” eldesi için dikkat edilmesi gereken hususları içermektedir [8, 9].

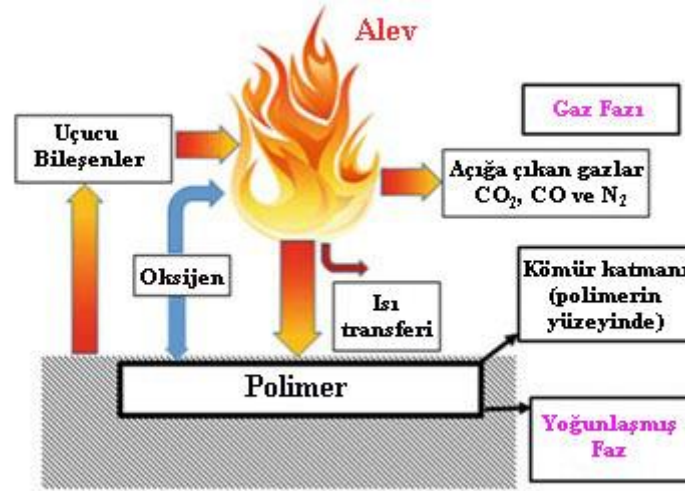
II. ALEV GECİKTİRİCİLERİN KULLANIMI

Modern yaşamımızda; polimerler, hafif olmaları, kimyasal kararlılık göstermeleri ve ucuz olmaları nedeniyle farklı çevre koşulları altında geniş bir kullanım alanı oluşturmaktadır. Bununla birlikte, polimerik malzemeler için önemli bir dezavantaj olan yüksek yanıcılık, polimerlerin gelişimini ve kullanımını kısıtlamaktadır. Polimerlerin yanıcılığını ve zehirli duman üretimini azaltmak için alev geciktiricilerin kullanımı, yeni polimerik malzemelerin geliştirilmesi için önem arz etmektedir. Özellikle; inşaat sektörü, elektrik elektronik elemanları ve nakliye sektörlerinde alev geciktiricilerin kullanılması yönünde düzenlemeler son derece önemlidir [1, 10, 11].

Çoğu polimer, petrol hidrokarbon kaynaklarından elde edilir ve bu nedenle son derece yanıcıdır. Ancak herhangi bir malzemenin alev alması için oksijen, ısı ve dış enerji gereklidir. Yanma sırasında, polimer parçacıkları havaya karışır ve polimer yüksek ısı enerjisine maruz kaldığında yapısında bozunma meydana gelir. Bu işlem sırasında havadaki partiküller yanıcı uçucu maddelerle birlikte gelişir ve atmosferik oksijenle karışır. Ortam sıcaklığı, tutuşma sıcaklığına (parlama noktası sıcaklığı) yakın veya üzerindeyse, havadaki bu parçacıklar tutuşacaktır. Isının bir kısmı, Şekil 1'de gösterildiği gibi, daha fazla bozunma için polimere geri beslenir ve benzer bir şekilde uçucu substratlar ve alevler, polimer tamamen yanana kadar döngüsel bir süreç içinde yayılacaktır. Bir polimerik malzemedeki yangın sonrası çıkan ürünler, polimerik malzemenin kimyasal bileşimine ve yanma işleminin gerçekleştiği koşullara bağlıdır. Özellikle duman, tam ve eksik yanma türlerinin bir kombinasyonudur, katı kalıntı ise çoğunlukla karbon ve küldür [2, 12].

Polimerin yanıcılığını etkileyen çeşitli faktörler vardır, ancak en önemli faktör polimerin kimyasal yapısıdır. Yangının yayılmasını önlemek amacıyla alev üretimini engellemek, bastırmak veya geciktirmek için, işleme sırasında polimere yaygın olarak alev geciktirici olarak bilinen dolgu maddesi eklenir. Literatürden, polimer ana

zincirine dahil edildiğinde veya kopolimerize edildiğinde, N-, P-, S-, Si- ve B içeren türev bileşikler gibi aromatik, heteroaromatik ve yanmayan heteroatomların yanıcılığı etkili bir şekilde azalttığı görülmektedir [3, 13, 14].



Şekil 1. Polimerin yanma döngüsünün şematik gösterimi [2]

Tüm alev geciktiriciler, ısıtma, piroliz, ateşleme veya alev yayılması sırasında yanma sürecine müdahale etmek için kimyasal ve / veya fiziksel bir mekanizma yoluyla buhar fazında veya yoğunlaştırılmış fazda hareket ederler. Örneğin, dolgu maddelerinin kullanılması esas olarak polimeri seyreltme ve ayrışma gazlarının konsantrasyonunu azaltma işlevi görür. Hidratlı dolgular ayrıca yanıcı olmayan gazları serbest bırakır veya yanma yüzeyindeki piroliz bölgesini soğutmak için endotermik olarak ayrışır. Halojen ve fosfor, ekzotermik süreçleri kesmek ve yanmayı bastırmak için radikal bir mekanizma ile buhar fazında hareket eder. Fosfor ayrıca yoğun fazda, yüzeyde kömür oluşumunu teşvik ederek, gazlı ürünlerin alev yayılmasını engellemek ve polimer yüzeyini ısı ve havadan korumak için bir bariyer görevi görür. Alev geciktirme mekanizmasının diğer bir ana kategorisi de; "şişen" olarak bilinen, ateşe veya ısıya maruz kaldıklarında, genellikle karbonlu gözenekli köpüklü bir kütle oluşturmak üzere şişen ve ısıya, havaya ve piroliz ürününe bariyer oluşturan mekanizmadır [4, 15, 16].

III. YANMAZLIK TESTLERİ

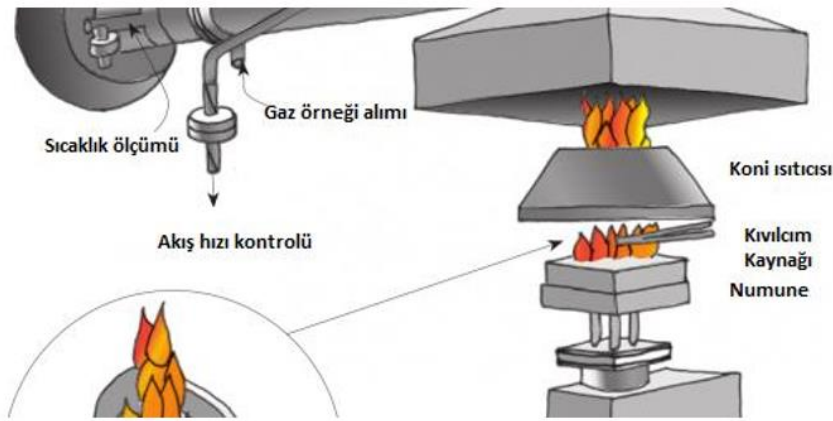
Polimerlerin alev geciktirici aktivitesini değerlendirmek için standart test yöntemleri ve prosedürleri geliştirilmiştir. Genel olarak, bir malzemenin alev geciktirici aktivitesi, tutuşma kolaylığı, alev yayılma hızı, ısı salınım hızı, duman üretim hızı ve yangın söndürme kolaylığı gibi bazı spesifik parametreler temelinde değerlendirilebilir [17].

Bütün bu özellikler, polimerin kimyasal yapısına, kullanılan alev geciktirici tipine ve bozunma bileşenlerinin doğasına bağlıdır. Isıtıldığında, bir polimer yanıcı ve yanıcı olmayan bileşenleri bozar. Örneğin metan ve etan gibi yanıcı hidrokarbon gazları açığa çıkabilir ve alev yayılma hızını izlemek için kullanılabilirler. Benzer şekilde su, karbondioksit, NH₃ ve CO gibi yanıcı olmayan bileşenler de açığa çıkabilir ve alev bölgesindeki ısıyı azaltarak malzemenin yanıcılığını azaltır. Bu nedenle, ısı salınım hızı polimer bozulmasını analiz etmek için önemli bir parametredir. Bu nedenle, polimerlerin yangına duyarlılığını değerlendirmek için ısı salınım hızı ve toplam ısı

açığa çıkarma oranını ölçmek önemlidir. Hedef uygulamaya göre polimerlerin yanıcılığı, çeşitli yerleşik yöntemler kullanılarak ölçülebilir. Yaygın olarak kullanılan bazı yöntemler aşağıda verilmiştir.

3.1 Koni Kalorimetresi

Koni kalorimetri test yöntemi (ASTM E1354) Amerika Birleşik Devletleri'nde standardize edilmiştir. Koni kalorimetre testi sırasında açığa çıkan ısıyı belirlemek için yakma işleminde tüketilen oksijen miktarı kullanılır. Buna paralel olarak; ısı yayma hızı, duman üretim hızı, karbon monoksit üretimi ve ateşlemeye kadar geçen süre ölçülür. Koni kalorimetresi genellikle kaplama malzemelerinin alev karşısı”nda davranışını incelemek için yapılır ve oluşan yangının boyutunu ve özelliklerini tanımlar. Şekil 2’de görüldüğü gibi, test ekipmanları koni şeklinde bir radyant ısıtıcı, numune tutucular, ateşleme bujisi ve gaz toplama sisteminden oluşur. Test örneği, 100kW/m²’ye kadar bir akıma maruz bırakılarak tutuşma süresi, duman salınımı, kütle kaybı ve yanma için gereken oksijen miktarı ölçülür. Isı salınım hızı, tüketilen oksijen hacmi ölçülerek belirlenir. Ayrıca toplam ısı yayma oranı, etkin yanma ısı ve CO ve CO₂ salınımı da değerlendirilebilir [18].



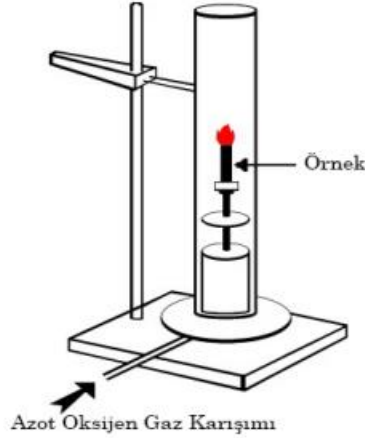
Şekil 2. Koni kalorimetresi test cihazı [18]

3.2 Limit Oksijen İndeksi Testi (LOI)

LOI testi, ilk olarak 1966'da Fenimore ve Martine tarafından tanıtılmıştır, daha sonrasında Amerika Birleşik Devletleri'nde (ASTM D2863) ve uluslararası alanda (ISO 4589) standardize edilmiştir. LOI testi, bir malzemenin yanmaya devam etmesi için gerekli olan minimum oksijen konsantrasyonunu (% hacim) hesaplar. Genel olarak, polimer malzemelerin yanma eğilimlerini inceler. Bir polimerin yanıcılığı, polimerin doğasına, kimyasal yapısına ve termal kararlılığına bağlıdır [19, 20].

Şekil 3'te LOI test düzeneğinin şekli verilmiştir. Test numunesi farklı konsantrasyonlardaki azot-oksijen karışımı varlığında dikey olarak ateşlenir. Test süresince, karışımdaki oksijen konsantrasyonu kademeli olarak artırılarak bu işleme yanma olayı gerçekleşene kadar devam edilir. Numunenin yanma davranışı izlenir ve yanma süresi hesaplanır. LOI değeri Eş.1'de belirtildiği gibi tüketilen oksijenin ortamdaki azot ve oksijen gazlarının toplam hacmine oranı olarak tanımlanır.

$$LOI = \frac{[O_2]}{[O_2] + [N_2]} \times 100 \quad (1)$$



Şekil 3. LOI test düzeneği [20]

Polimer molekülündeki H-C oranı ne kadar yüksekse, polimer, o kadar yanıcı olmaktadır. Bununla birlikte hava %21 oranında O₂ gazı içerdiği için, LOI değeri 21'in altında olan polimerler kolaylıkla alevlenebilir, LOI değeri 21'den daha büyük olan polimerler ise kendi kendini söndürebilir. Bir polimerin alev geciktirici özellik göstermesi için LOI değerinin 21'den büyük olması gerekir [21, 22]. Tablo 1'de çeşitli polimerlerin LOI değerleri verilmektedir [23].

Tablo 1. Farklı polimerler ve % LOI değerleri [23, 24]

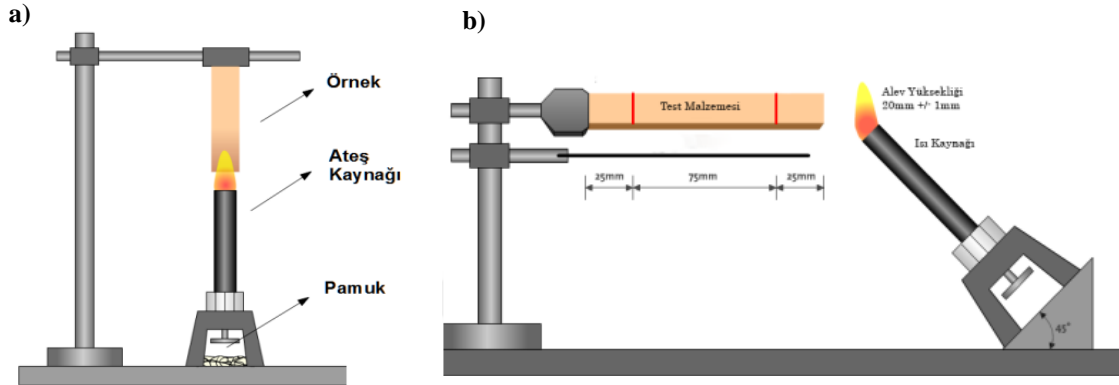
Polibütadien	18.3	Naylon	20
Selüloz	19	PET	20
PEO	15	PP	17.5
PS	18.3-19	PTFE	90-95
PMMA	16.6-18.2	PU	16.5
Karışık PE	19	Yumuşak PVC	14-35
SBR	16.9	Sert PVC	40-45

3.3 UL 94 Yanma Testi

UL 94 yanma testi Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Underwriters Laboratuvarları tarafından geliştirilmiştir. Prensip, ufak bir alev kaynağı tarafından alevle maruz kalan bir polimerin yanma ve alev yayılma özelliklerini inceler. Genel olarak, cihaz ve malzemelerdeki plastik kısımların bir kaynak tarafından tutuşturulup sonrasında alev kaynağının uzaklaştırılmasının ardından yanma özelliklerinin incelenmesi için kullanılan faydalı bir testtir [25].

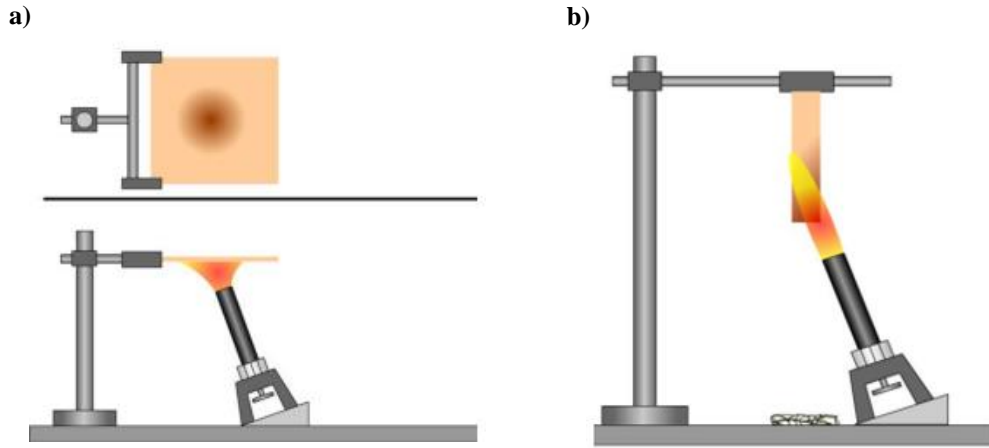
UL 94 testinin uygulanma yöntemine göre çeşitleri vardır. Bunlardan birisi, UL 94-V (dikey) (ASTM D3801–10) yanma testidir. İnce polimer örneklerinin yanma davranışını incelemek için kullanılır [26]. UL 94-V düzeneği, Şekil 4 a'da gösterildiği gibi, dikey test plakasının 10 saniye aralıklarla alevle maruz bırakıldıktan sonra alevin uzaklaştırıldığı zaman pamuğa damlama yapıp yapmayacağı gözlenir. UL 94-HB (yatay) (ASTM D3801–10 ve ASTM D635–10) yanma testinde, yere paralel olan test plakasının ucunun 45 derecelik açı ile ısı kaynağının yaklaştırılıp 30 saniye ısı uygulanması esasına dayanır (Şekil 4 b). Bu testte malzemenin yatay bir şekilde alevi ne

miktarda yaydığı ölçülmektedir. Yatay numune, malzemenin ilk 5'te 1'lik kısmı yandıktan sonraki 5'te 3'lük kısmın ne kadar sürede yandığı raporlanır [27].



Şekil 4. UL-94 V (a) ve UL 94-HB (b) test düzenekleri [27]

Son olarak UL 94-5V testi de (ASTM D5048-09), malzemenin hem yanma hem de parlama sürelerini ve oluşan deliklerin yanı sıra yanan test numunesinin damlamasını değerlendiren iki aşamalı bir testtir. Şekil 5 a'da görüldüğü gibi birinci aşamada malzemeye zemine 20 derece açı ile alev kaynağı uygulanır. Bu işlem beş saniye aralıklarla beşer saniye süreyle beş kez uygulanır. Şekil 5 b'de görüldüğü gibi ikinci aşamada da aynı işlemler malzeme dikey olarak asıldığında tekrarlanır. Her aşama sonrası numune gözlenen değişiklikler rapor edilir [27].

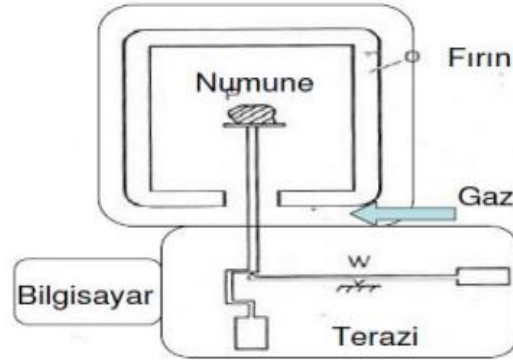


Şekil 5. UL-94 5V 1. test (a) ve UL 94-5V 2. test (b) test düzenekleri [27]

3.4 Termogravimetrik Analiz (TGA)

TGA (ASTM D3045 - 92 (2010)) genel olarak endotermik ve ekzotermik olayları, ısınma, soğutma ve bunlar gibi birçok işlem sırasında meydana gelen kütle kaybı ve/veya kütle kazanımlarını gözlemlemeye yarar. Polimerlerde, plastiklerde, laminantlarda, kompozitlerde yapıştırıcılarda, gıdada, boyada, ilaçta, kauçukta, petrolde kullanılan bir analiz yöntemidir. TGA analizinde, kontrollü bir atmosferdeki bir numunenin kütlesi, sıcaklığın veya zamanın bir fonksiyonu olarak izlenir. Kütlelinin veya kütle yüzdesinin, zamana, sıcaklığa ve atmosferdeki değişime karşı grafiği, termogram veya bozunma eğrisi olarak adlandırılır [28]. TGA cihazı Şekil

6'da gösterildiği gibi, bir fırın, duyarlı bir analitik termo terazi, inert veya reaktif gaz atmosferi temin etme sistemi ve cihazın kontrol edildiği, verilerin değerlendirildiği bir mikro işlemciye sahiptir [29].



Şekil 6. TGA cihazının şematik gösterimi [29]

Bu yöntemde numuneler, sabit N_2 atmosferi altında oda sıcaklığından $900^\circ C$ 'ye, bazı yeni TGA cihazlarında $1200^\circ C$ 'ye kadar $10^\circ C/dak.$ hızla ısıtılır. Bu analiz sayesinde hem polimerlerin bozulma sıcaklıkları hem de karbonlaşma verimleri tayin edilir. Karbonlaşma verimi, TGA analizinde $800^\circ C$ 'de bozunma sonucunda kalan karbonlaşmış kalıntının tüm malzeme ağırlığına oranının yüzdesi olarak ifade edilir. Genel olarak, malzemelerin yanmaya karşı dirençlerinin ölçümünde kullanılan bir analiz yöntemidir. Karbonlaşma verimi yüksek olan malzemeler yanmaya karşı daha dirençlidir [28].

IV. KULLANILAN ALEV GECİKTİRİCİLER

4.1 Halojen İçeren Alev Geciktiriciler

Halojen içeren alev geciktirici malzemeler, plastik sanayinde en çok kullanılan gruplardan biridir. Halojen içerikli bileşiklerin etkinliği içindeki I, Br, Cl ve F elementlerine bağlıdır. İyot içerikli bileşikler polimer işlenmesi sırasında kararlı olmadıkları için çabuk parçalandıklarından sanayide kullanımları kısıtlıdır. Buna karşın, flor içerikli bileşikler de çok kararlı ve parçalanması zordur. Alev geciktirici görevi görmek için brom ve klor içerikli bileşikler kullanılır. Brom içerikli bileşikler, klor içerikli bileşiklere göre daha etkili alev söndürücü etkiye sahiptir [30]. Tablo 2'de sık kullanılan bazı bromlu ve klorlu alev geciktirici örnekleri gösterilmiştir.

Halojenli alev geciktiriciler, katkı maddesi, reaktif ve polimerik olmak üzere üç genel sınıfa ayrılır. Katkı maddesi olarak, polimer işleme ekipmanlarında polimere karıştırılır, aynı zamanda stabilizatörler, pigmentler ve yardımcı kimyasallar gibi diğer bileşenler de eklenir. Bu tipik olarak polimerik alev geciktiriciler için de geçerlidir, ancak bu malzemeler polimerik yapıları nedeniyle düşük yüklenme ve daha az çevresel kaygı oluşturma avantajına sahiptir. Reaktif alev geciktiriciler, ya polimer omurgasına tepkimeye girerek ya da bunun üzerine aşlanarak polimerin bir parçası haline gelir [31].

Halojen içeren alev geciktiriciler, yanma sırasında, buhar fazında açığa çıkan radikal zincir mekanizmasına kimyasal olarak müdahale ederek iş görür. Bu alev geciktiriciler, tutuşmanın başlamasını önler veya geciktirir ve bir yangın başladığında yanma hızını yavaşlatır [32].

Tablo 2. Halojen içerikli alev geciktiriciler ve formülleri [32, 33]

Amonyum bromür NH ₄ Br	2,3-dibromo propil eter C ₆ H ₁₀ Br ₄ O	Dekabromodifenil oksit C ₁₂ Br ₁₀ O	Polipentabromobenzil akrilat (C ₁₀ H ₅ Br ₅ O ₂) _n
Tribromofenol C ₆ H ₃ Br ₃ O	Dekabromodifenil eter C ₁₂ Br ₁₀ O	Kloroparafınler C _X H _Y Cl _Z	Alisiklik klorlu bileşik C _n H _{2n-1} Cl
Tetrabromobisfenol-A C ₁₅ H ₁₂ Br ₄ O ₂	Oktabromodifenil oksit C ₁₂ H ₂ Br ₈ O	Pentabromodifenil eter C ₁₂ H ₃ Br ₅ O	Hekzabromosiklododekan C ₁₂ H ₁₈ Br ₆

Son yıllarda brom ve klor içeren bu malzemelerin canlılar ve çevre üzerinde zararlı etkileri olduğu için kullanımı periyodik olarak kısıtlanmıştır. Günümüzde bu malzemeler yerine halojen bileşiklerinin geri dönüşümünün sağlandığı veya halojen içermeyen alev geciktiricilerin ortaya koyulduğu çalışmalar üzerine yoğunlaşmıştır [34, 35].

4.2 Hidroksit İçeren İnorganik Alev Geciktiriciler

İnorganik katkı maddelerine örnek, alüminyum hidroksit (Al(OH)₃), magnezyum hidroksit (Mg(OH)₂), antimon trioksit, huntit ve hidromanyezit, nanokil, çinko borat ve zirkonyum fosfat verilebilir. Son yıllarda, alüminyum hidroksit (Al(OH)₃) ve magnezyum hidroksit (Mg(OH)₂), hidroksit içeren inorganik alev geciktiriciler arasında en yaygın olarak kullanılanlardır. Düşük maliyetle üretilebilir olmalarından ve kolay işlenebilir olmalarından dolayı kompozit malzemelerde alev geciktirici katkı maddeleri içerisinde büyük bir öneme sahiptir. Bu tür inorganik alev geciktiriciler, yapılarında bulundukları suyu yüksek ısıya (150-400°C) maruz kaldığında açığa çıkarırlar ve soğutma etkisi ile yanmayı durdururlar. Ayrıca açığa çıkan su, buhar fazındaki yanabilen gaz ürünlerin konsantrasyonunu seyreltmektedir ve dolayısıyla yanma esnasında dumanın miktarını azaltır [5, 36-38].

Hidroksit bazlı inorganik katkı maddelerinin en büyük dezavantajı, etkili bir alev geciktirici olması için %35-65 gibi çok yüksek bir oranda polimer içerisine yükleme yapılması gerektiğidir. Bu yüksek yüklemeler polimerin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Buna karşılık, yüksek yükleme ile kullanımında mevcut yanıcı polimerik malzeme miktarı doğal olarak az kullanılır [39, 40]. Ayrıca, hidroksit bazlı alev geciktiriciler ile polimer ara yüzey uyumluluğunu arttırmak için yüzey modifikasyonları da yapılabilir. İyileştirilmiş ara yüzey uyumluluğu ile alev/duman özellikleri, mekanik özellikler ve elektriksel özellikler gibi polimerin bazı spesifik özellikleri iyileştirilebilir [41].

Zhang ve ark. [42], düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve etilen vinil asetat (EVA) kopolimer karışımlarında alev geciktirici katkı maddesi olarak alüminyum hidroksit ve magnezyum hidroksit kullanımını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada nanokil (organokil) ve yangın geciktiricilerin etkisi ile polimer karışımın alev geciktirici özelliği iyileştirilmiştir. Chen ve ark. [43], magnezyum hidroksiti (MH) silan ve silikon yağı ile modifiye ederek PP kompozit eldesinde kullanmışlardır. Modifiye edilen MH ile hazırlanan PP/MH kompozitin ara yüzey uyumu ve mekanik özellikleri iyileştirilmiştir. Ayrıca, PP/MH kompozit malzemenin termal kararlılığının arttığı, alev geciktiriciliğinin iyileştirildiği ve LOI değerinin arttığı rapor edilmiştir. Başka bir çalışmada Ai ve ark. [44], epoksi reçine içinde magnezyum hidroksitin yükleme dozajını ve maliyetini azaltmak için bor esaslı bir organik bileşik kullanmıştır. Kullandıkları bu organik/inorganik alev geciktiricinin iyi sinerjik etkiler oluşturduğu ve alev geciktirme performansının yükseldiği görülmüştür.

4.3 Azot İçeren Alev Geciktiriciler

Azot içeren alev geciktiriciler yanma sırasında çevreye inert gaz salınımı sağlayarak yangın ortamında gaz fazındaki oksijen konsantrasyonunu azaltırlar ve yanma sürecini yavaşlatırlar. Yün, ipek, deri vb. gibi azot içeren doğal polimerler yangına dayanıklılık gösterir. Bu nedenle, bazı azot içeren organik bileşikler, polimerlerde yangına dayanıklılık özellikleri göstermek için katkı maddesi olarak kullanılmaktadır [45, 46].

Alev geciktiriciler olarak başlıca ilgi konusu olan nitrojen bileşikleri melamin, guanidin ve bunların türevleridir. Heterosiklik azotlu bir bileşik olan melamin 345 °C'lik yüksek bir erime sıcaklığına sahiptir. Melamin yüksek sıcaklıklarda endotermal olarak ayrışır, yani yanma sırasında ısı alıcı gibi davranır ve yanıcı olmayan N_2 , NH_3 , CO_2 , H_2O gibi gazları salar. Ayrıca, melamin, melem ve melon gibi güçlü bir kömür yapısı üreterek termal olarak kararlı yoğunlaştırılmış bileşikler de oluşturur. Melamin, ulaşım araçlarında mobilya ve döşemelerde esnek poliüretan köpükler için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca polyamid 6 ve polyamid 6,6'da melamin siyanürat (MC) kullanılmaktadır. Ayrıca kablolarda çinko veya alüminyum içeren melamin polifosfatlar kullanılmaktadır [47-49].

Son yıllarda, azot ile sinerjik etki oluşturan fosfor bileşiklerinin birlikte kullanımına ağırlık verilmiş ve şişen alev geciktiriciler (IFR) geliştirilmiştir [50, 51]. Örneğin, Hu ve ark. [52], kömürleştirici ajan olarak sentezledikleri yeni bir triazin türevinin karakterizasyonunu yapmışlar ve alev geciktirici özelliğini incelemişlerdir. Sentezlenen azot içerikli alev geciktirici, amonyum polifosfat ile birlikte kullanıldığında azot ve fosfor elementleri arasındaki sinerjiden dolayı, polietilenin (PE) alev geciktirici davranışını iyileştirdiği görülmüştür. Qian ve ark. [53], geliştirdikleri yeni bir fosfor, nitrojen ve silikon içerikli organik/inorganik şişen alev geciktirici sistemi epoksi reçinelerin alev geciktiriciliği üzerindeki performanslarını incelemişlerdir. Farklı bir çalışmada, Wang ve ark. [54], yeni bir fosfor-azot şişen alev geciktirici sentezlemişler ve karakterize etmişlerdir. Sentezledikleri bu alev geciktirici katkı maddesini poliüretan köpüklerde (PÜK) kullanmışlardır. Sonuçta, şişen alev geciktirici malzemenin kömürleşmiş yüzey tabakası oluşturarak PÜK'ün ayrışmasını yavaşlattığı ve gaz ile yoğunlaşmış faz arasındaki ısı ve kütle transferini engelleyerek fiziksel bir bariyer görevi gördüğü rapor edilmiştir. Çok yakın zamanda, Zheng ve ark. [55], poliamid 6'nın (PA6) alev geciktiriciliğini geliştirmek için yeni bir fosfor-azot içerikli katkı maddesi kullanmışlardır. Çift vidalı ekstruderde hazırlanan PA6 kompozitlerinin yanmazlık testlerinde, fosfor-azot içerikli alev geciktiricilerin eklenmesi PA6'nın alev geciktiriciliğini arttırmıştır.

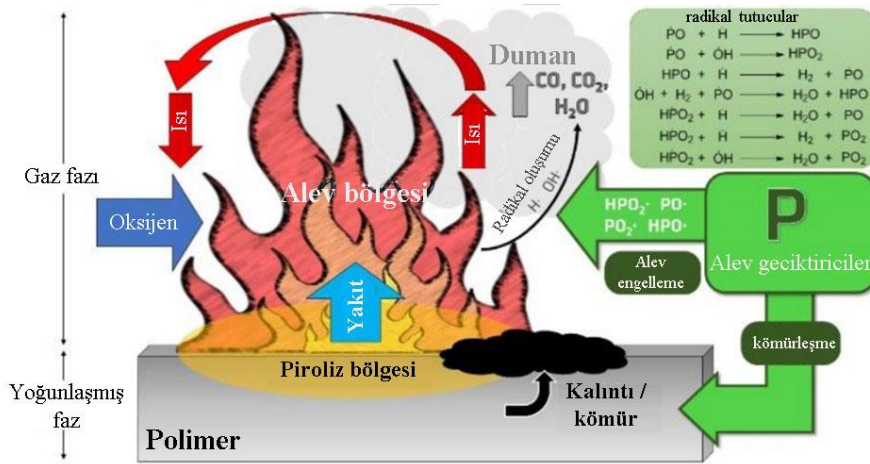
4.4 Fosfor İçeren Alev Geciktiriciler

Fosfor içeren alev geciktiriciler, yanma sırasında koruyucu kömür oluşturması nedeniyle, uzun zamandır halojenli alev geciktiricilerin yerine kullanılmaktadır [56, 57]. Yanma esnasında, fosfor içeren bileşikler alev ile etkileşerek fosforik asit oluşturur, daha sonra fosforik asit dimerleşerek su molekülleri açığa çıkar ve pirofosfat yapıları oluşur. Açığa çıkan su moleküllü gaz fazını seyrelterek yanmaya sebep olan oksitleyicilerin konsantrasyonunu azaltır (Şekil 7). Tablo 3'te sanayide sık kullanılan fosfor içerikli alev geciktiricilere örnek verilmiştir [58, 59].

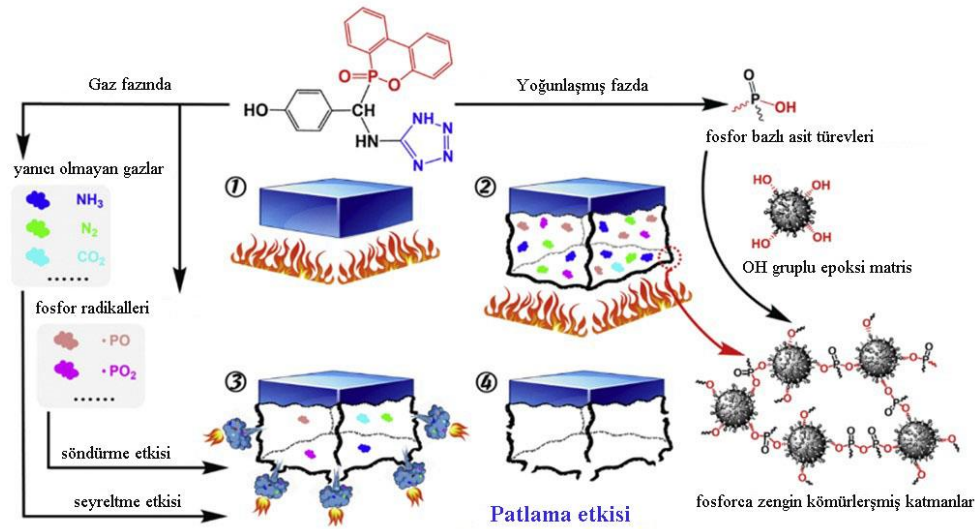
Tablo 3. Fosfor içeren alev geciktiriciler ve formülleri [59, 60]

Triaril fosfat $Ar_3OP(OR)_3$	Trikloropropil fosfat $C_9H_{18}O_4Cl_3P$	Trietil fosfat $C_6H_{15}O_4P$	Dimetil metilfosfonat $CH_3PO(OCH_3)_2$
Metal fosfinat $M(H_2PO_2)_x$	Amonyum polifosfat $[NH_4PO_3]_n(OH)_2$	Sikloalifatik fosfat $(C_nH_{2n-1})_3(PO_4)_2$	Alüminyum dietilfosfinat $((C_2H_5)_2PO_2)_3Al$
Fosforik asit H_3PO_4	Organik fosfinat O_2PR_3	Fosfin oksit OPR_3	Fosfonat ester $O=P(OR)_3$
DOPO $C_{12}H_9O_2P$	Kırmızı fosfor P	Trifenil fosfat $C_{18}H_{15}O_4P$	Tris(kloropropil)fosfat $C_9H_{18}Cl_3O_4P$

Fosfor içeren alev geciktiriciler inorganik veya organik olabilir [61]. En yaygın olarak kullanılan inorganik bileşikler kırmızı fosfor ve amonyum polifosfattır. İkincisi, esas olarak şişen formülasyonlarda kullanılır. Alev geciktirici özellikler sergileyen organik fosfor içeren bileşikler daha çoktur. Yaygın olarak kullanılan üç ana organik fosfor dolgu grubu vardır: fosfinatlar, fosfonatlar ve fosfat esterler. Trietil fosfat, pratikte polyester laminatların alev geciktiriciliğini arttırmak için ve selülozlerde kullanılan organik bir fosfattır. Pentaeritritol yapısının kömür oluşturma yeteneğinden yararlanan pentaeritritol fosfatlar gibi sikloalifatik fosfatlar da kullanılır. Aril fosfatlar, ek bir organik fosfat grubu içerir. Trifenil fosfat bu grubun bir temsilcisidir; polifenilen oksit-yüksek etkili polistiren ve akrilonitril bütadien stiren(ABS)-polikarbonat karışımları gibi mühendislik termoplastikleri için alev geciktirici katkı maddesi olarak kullanılır. ABS-polikarbonat karışımlarının (ayrıca termoplastik polyesterler, poliamidler ve polikarbonatların yanı sıra) alev geciktiriciliğinin iyileştirilmesi, "aromatik difosfatlar" ailesinin bir üyesi, tam olarak tetrafenil resorsinol difosfat ile de sağlanabilir. Fosfonatlara dönersek, dimetil metilfosfonat, alüminyum trihidroksit (ATH) dolgulu polyester reçinelerinde alev geciktirici olarak kullanılır. Öte yandan, fosfinatlar sınıfına ait alüminyum dietilfosfinat, poliamidlerin ve epoksilerin alev dayanımını iyileştirmek için bir melamin ile kombinasyon halinde kullanılır. Yukarıda bahsedilen bileşiklerin yanı sıra, halojenli fosforlu alev geciktiriciler, hem halojen hem de fosfor bileşenlerinin özelliklerini bir araya getirdikleri için yaygın olarak kullanılan bir grubu oluşturmaktadır. Bu kategorideki bileşiklere iki örnek, tris(kloropropil)fosfat ve tris(2-kloroetil)fosfattır [1, 58-60, 62].

**Şekil 7.** Polimerik bir malzemenin alev alması ve fosfor bazlı alev geciktirici kullanımının rolü [58]

Fosfor içeren alev geciktiriciler arasında; 9,10-dihidro-9-oksa-10-fosfafenantren 10-oksit (DOPO) grubu, yüksek termal stabilitesi, iyi oksidasyonu, hidroliz direnci ve yüksek verimli alev geciktirmesi nedeniyle oldukça popüler bir yapıdır. Aktif P-H bağına dayalı olarak, DOPO'nun çeşitli monomere kimyasal olarak dahil edilmesi, yeni fosfor içerikli alev geciktiricilerin hazırlanmasında önemli bir strateji haline gelmiştir. DOPO'nun türevlerinin hazırlanması, nükleofilik katılma ve moleküler yeniden düzenleme ile gerçekleşir [56, 63-67]. Bazı araştırmacılar DOPO ve türevlerinin alev geciktirme mekanizmasını, düşük molekül ağırlıklı fosfor içeren türlerin serbest bırakılması ve bunların alevde H ve OH radikallerini tutmasıyla açıklamışlardır [68]. Wang ve ark. [69] tarafından yüksek verimli alev geciktirici aktiviteye sahip yeni bir DOPO bazlı tetrazol türevi sentezlenmiş ve epoksi reçinesinin alev geciktiriciliğini iyileştirmek için birlikte sertleştirme ajanı olarak epoksi matrisine dahil edilmiştir. Sentezlenen epoksi termosetlerin alev geciktirici mekanizması, termo-oksidatif bozunması ve piroliz davranışlarının yanı sıra epoksi termosetlerin artık kömürünün morfolojisi ve yapısı analiz edilerek kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. DOPO fonksiyonlu epoksi termoset hem gaz hem de yoğunlaştırılmış fazda yüksek verimli alev geciktirici aktivite göstermiştir. Gaz fazında, fosfor radikallerinin söndürme etkisi ve yanıcı olmayan gazların seyreltici etkisi, yoğunlaştırılmış fazda ise; fosfor bazlı asit türevleri ile epoksi matris arasındaki yoğunlaştırılmış reaksiyondan kaynaklı şişen fosforca zengin kömür tabakalarının bariyer oluşturması etkili olmuştur. Ayrıca, UL-94 testi sırasında fosfor radikalleri ve yanıcı olmayan gazların kapalı kömür tabakalarının yüzeyinden yoğun şekilde salınmasından kaynaklı ilginç bir patlama etkisi görülmüştür (Şekil 8).



Şekil 8. DOPO fonksiyonlu epoksi termosetin alev geciktirici mekanizması ve patlaması [69]

V. KENDİLİĞİNDEN YANMAZLIK ÖZELLİĞİ GÖSTEREN POLİMERLER

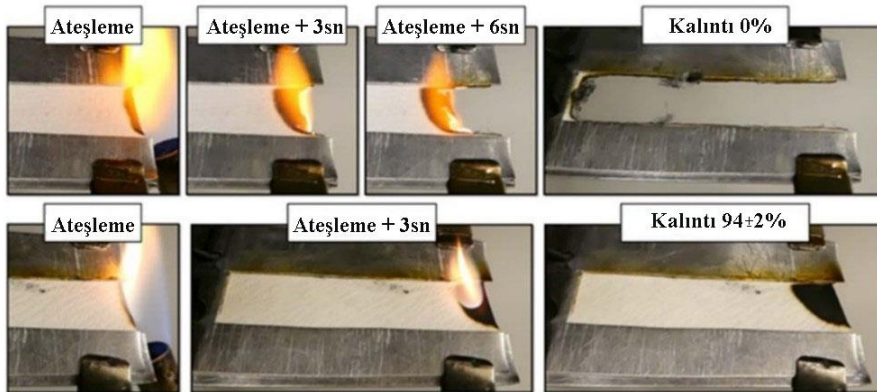
Alev geciktirici polimer malzemelerin geliştirilmesinde, mevcut polimerlere alev geciktirici katkı maddelerinin eklenerek kullanımı oldukça yaygındır. Bir diğer yöntem de, alev geciktiriciyi polimer zincirine kovalent olarak bağlamak için reaktif formunda kullanmaktan ibarettir. Bu yöntemde, alev geciktiriciler (çoğunlukla reaktif halojenli veya fosfor bazlı moleküller) monomere kovalent olarak bağlanarak direkt polimerizasyona tabii tutulabilir, başlatıcıya eklenerek zincir uzatıcılar gibi davranarak direkt polimerleştirilebilir ya da sentezlenmiş polimerlere post-modifikasyon (aşılama) yapılarak yapıya dahil edilir. Elde edilen malzemenin, moleküler

düzeyde alev geciktirici ajanı polimer içerisinde homojen olarak dağılır [8, 70-72]. Polimer içerisine alev geciktirici etki gösteren moleküllerin kimyasal modifikasyonu, yapıdan alev geciktirici katkı maddelerinin göçünü engellemesi ve opak olmayan alev geciktiricilerin gelişmesine olanak sağlayacağı için umut vericidir. Ayrıca; bu yöntem ile, polimer içerisinde heterojen alev geciktirici katkı maddelerinin varlığından kaynaklanan mekanik özelliklerdeki bozulma önenebilir ve polimerin işlenebilirliği ve şeffaflığı iyileştirilebilir [6, 7, 73].

Literatürde, Eren ve ark.'nın, halka açılma metatez polimerizasyonu (ROMP) ile sentezlenmiş fosfor içerikli alev geciktirici polimer çalışmaları mevcuttur. Bir çalışmada, fosfonat esteri veya fosfonik asit esaslı homo ve blok kopolimerler sentezlenmiş ve kendi içinde ısıl kararlılıklarını kıyaslamışlardır. Sonuçta, alev geciktirici başka bir katkı maddesi olmaksızın polimerlerin kendiliğinden yanmazlık özelliği gösterdiği açıklanmıştır [9]. Daha sonraki yıllarda çalışmalarını genişletmiş ve aromatik grupları da çalışmalarına ekleyerek, fosfor ve aromatik grup içerikli yeni ROMP kopolimerleri sentezlenmiş ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, polimerlerdeki fosfor içeriği, termal özellikler üzerinde belirgin bir etki göstermiş ve aromatik gruplar da hava oksidasyonu üzerinde sinerjik kömürleşme etkisi oluşturmuştur [74]. Aynı araştırma grubunun, fosfor ve fenil bazlı ROMP polimerlerini şişen alev geciktirici katkı maddesi olarak, oktafenil-çok yüzü oligomerik silseskioksanın (POSS) ve polipropilen (PP) karışımında eritilerek kompozit yapımında kullandığı da görülmektedir. Termal özelliklerin incelendiği bu çalışmada, fosfor ve fenil içeren polimerlerin PP kompozitlerinin yanıcılığını optimize etmede oldukça güçlü katkı maddeleri olduğu kanıtlanmıştır [75].

Çakmakçı ve ark. [76], organik-inorganik hibrit materyalleri hazırlamak için fonksiyonel silika nanopartiküllerini DOPO ile fonksiyonlandırmıştır. Sonrasında, Hazırlanan DOPO fonksiyonlu nanosilika parçacıkları ile organik matris arasında bağlama maddesi olarak kullanılan bir bismaleimid reçinesi yardımıyla kimyasal olarak eklenmiştir. Sonuçta, sentezlenen hibrit kaplamaların termal özellikleri ve alev geciktiriciliği iyileştirilmiştir. Kaplamanın alev geciktiriciliğinin artmasında, fosfor, azot ve silikonun sinerjik etkisinin etkili olduğu gözlenmiştir.

Grubb ve ark. [77], alev dayanıklı polimerik malzemelerin hazırlanması için sentezledikleri polimere fosfor gruplarını aşılamışlardır. Şekil 9'da görüldüğü gibi alev geciktirici polimer ile kaplanmayan kağıdın kolayca tutuştuğu ve güçlü alevlerle tamamen yandığı ve testin sonunda hiçbir kalıntı bırakmadığı görülmüştür. Alev geciktirici polimer ile kaplanan kağıdın ise, alev uygulamasından ortalama 3 saniye içinde kendi kendine sönmeye davranışı gösterdiği ve yaklaşık % 94 gibi bir kısmının yanmadan kaldığı rapor edilmiştir.



Şekil 9. İşlenmemiş laboratuvar filtre kağıdı (üstte) ile fosfor grupları içeren polimer ile kaplanmış filtre kağıdının (altta) tutuşabilirlik testlerini gösteren anlık görüntüler [77]

Fan ve ark. [78], sentezledikleri poliamide (PA6) silikon (polidifenilsiloksan) içrikli bir alev geciktiriciyi kovalent olarak bağlamışlardır. Ayrıca, sentez aşamasında hem PA6 ve silikon için “zincir bağlayıcı” görevi için, hem de yanmadan sonra kömürleşme kapasitesini arttırmak için etilen glikol (EG) eklenmiştir. Yapılan çalışmada yanma sonrası kömür kalıntıları ve piroliz uçucuları araştırıldıktan sonra, polimer içindeki silikonun zengin koruyucu tabaka oluşumunda, piroliz uçucularının difüzyonunu azaltarak ve ısı transferini kısıtlayarak alev geciktirmede temel faktör olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca, silikonun kütle kaybının yanı sıra polimer eriyiklerinin damlamasını önlediği rapor edilmiştir.

Farklı bir çalışma olarak, Shan ve ark. [79], tiyazol fonksiyonlu benzoksazinlerin sentezini ve yanıcılığını araştırmıştır. Okzazin reaksiyonu yoluyla olağan polimerizasyona ek olarak tiyazol halkasının karbon-karbon çift bağının neden olduğu çapraz bağlanma ile sentezlenen reçine, heterosiklik halkaları ve çapraz bağları nedeniyle büyük alev geciktirici özellikler sergilemiştir. Ayrıca, halojenli ve/veya fosforlu gruplar kullanılmadan yanıcı olmayan bir polimer olarak iyi bir aday olabileceği değerlendirilmiştir. Wang ve ark. [80] da benzer şekilde benzoksazin sentezi ve yanıcılığı üzerine çalışma yapmıştır. Yapılan araştırmada furfurilamin ve desoksiyanisinden türetilmiş yüksek performanslı benzoksazin monomeri (BHDB-Bz) ve kontrol numunesi olarak bisfenol A bazlı (BPA-Bz) sentezlenmiştir. Desoksiyanizoin yapısının mükemmel karbonizasyon kapasitesinden yararlanan poly(BHDB-Bz), %40.0'lık yüksek bir LOI değeri ile olağanüstü alev direnci sergilerken, poly(BPA-Bz) %28,0 LOI değeri vermiştir. Bu nedenle, furfurilamin ve desoksiyanisoin kombinasyonunun, yüksek performanslı, yüksek termal direnç ve yangın güvenliği uygulamaları için umut verici bir aday olduğu değerlendirilmiştir.

IV. SONUÇLAR

Polimer malzemelerin günlük hayatımızda yoğun olarak kullanımı, başlıca hafif olmaları ve kolay işlenebilir olmalarından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, polimerler, nispeten yüksek yanıcılıklarıyla da bilinirler; çoğu zaman yanma sırasında aşındırıcı veya zehirli gaz ve duman üretimi gerçekleşir. Polimerlerin alev geciktirici davranışlarını iyileştirmek, polimerlerin kullanım alanlarını genişletmek için önemli bir parametredir.

Halojenli katkı maddeleri gibi çeşitli alev geciktirici katkı maddeleri, çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle aşamalı olarak kullanımdan kaldırılırken, polimerlerin yangına tepkisi ve yangına dayanıklılık performansları açısından güvenlik gereksinimleri giderek artmaktadır. Bu nedenle şimdiki çaba, polimer malzemeler için etkili ve çevre dostu alev geciktirici sistemler geliştirmekten ibarettir.

Halojenli olmayan yangın geciktirici katkı maddeleri arasında fosfor ve azot bazlı bileşiklerin birlikte kullanıldığında sinerjik etki göstererek alev yayılmasının kontrolünde önemli bir ilerleme sağlamaktadır. Öte yandan, alüminyum, magnezyum, silikon ve bunların hidroksitleri veya oksitleri dahil olmak üzere inorganik alev geciktiriciler, alev geciktirmede hala önemli rol oynarlar.

Fiziksel olarak eklenen bu alev geciktiricilerin yapıdan sızması çevre kontaminasyonu ve biyolojik birikimi için önemli bir problemdir. Ayrıca, eklenen inorganik tuzlar polimerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini tehlikeye atarlar. Alev geciktiricilik için popüler olan diğer yol, alev geciktirici elementleri molekül zincirlerine kimyasal olarak dahil etmektir.

Son incelemeler, kovalent olarak bağlanmış fosfor başta olmak üzere azot ve silikon içerikli polimerlerin hazırlanmasını ve özelliklerini tartışmaktadır. Bu bileşikler monomer olarak kullanılıp direkt polimerizasyonu gerçekleştirilir ya da yüzey aşılama ile polimer zincirlerine dahil edilir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda polimerlere katkı maddesi konulmadan polimerin kendiliğinden alev geciktirici özellik göstermesi gerçekleştirilir. “Yanmaz polimerler” diye adlandırılan bu yeni sentetik yöntemde katkı maddelerinin polimer zincirlerine dahil edilmesi ile, işleme sırasında veya zamanla matris sızıntısı olmadan homojenlik sağlanır.

KAYNAKLAR

- [1] Lu S-Y, Hamerton I (2002) Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant polymers. *Progress in Polymer Science* 27 (8):1661-1712. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(02\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(02)00018-7)
- [2] Sinha Ray S, Kuruma M (2020) Polymer combustion and flame retardancy, In: *Halogen-Free Flame-Retardant polymers*. Springer International Publishing ss 5-9.
- [3] Gu L, Chen G, Yao Y (2014) Two novel phosphorus–nitrogen-containing halogen-free flame retardants of high performance for epoxy resin. *Polymer Degradation and Stability* 108:68-75. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.05.030>
- [4] Lewin M (1998) Physical and chemical mechanisms of flame retarding of polymers. *Fire Retardancy of Polymers*: Elsevier, ss 3-32.
- [5] Akdoğan E, Tarakçılar AR, Topcu M, Yurtseven R (2015) Alüminyum hidroksit ve magnezyum hidroksit katkısının termoplastik poliüretan malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 21 (8):376-380. <https://doi.org/10.5505/pajes.2015.24572>
- [6] Vahabi H, Sonnier R, Ferry L (2015) Effects of ageing on the fire behaviour of flame-retarded polymers: A review. *Polymer International* 64(3):313-328. <https://doi.org/10.1002/pi.4841>
- [7] Vahabi H, Laoutid F, Mehrpouya M, Saeb MR, Dubois P (2021) Flame retardant polymer materials: An update and the future for 3D printing developments. *Materials Science Engineering: R: Reports* 144:100604. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100604>
- [8] Mincheva R, Guemiza H, Hidan C, Moins S, Coulembier O, Dubois P, Laoutid F (2019) Development of inherently flame—retardant phosphorylated PLA by combination of ring-opening polymerization and reactive extrusion. *Materials* 13(1):13. <https://doi.org/10.3390/ma13010013>
- [9] Eren T, Aşçı A (2015) Synthesis and characterization of phosphonate based polynorbornene polymers derived from romp (ring opening metathesis polymerization) method and investigation their flame retardant properties. *Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences/Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi* 33(4):615-625. <https://eds.yildiz.edu.tr/sigma/>
- [10] Yıldırım S, Çelik E (2014) Alev Geciktirici Huntit ve Hidromanyezit Nanopartikül Takviyeli Polimetrik Kompozit Kaplamalar. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 14 (3):387-393.

- [11] Velencoso MM, Battig A, Markwart JC, Scharrel B, Wurm FR (2018) Molecular firefighting—how modern phosphorus chemistry can help solve the challenge of flame retardancy. *Angewandte Chemie International Edition* 57 (33):10450-10467. <https://doi.org/10.1002/anie.201711735>
- [12] Katircioğlu-Bayel D (2018) Alev geciktirici mineral dolgu maddeleri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 7 (3):1175-1179.
- [13] Çakmakçı E, Güngör A (2013) Preparation and characterization of flame retardant and proton conducting boron phosphate/polyimide composites. *Polymer Degradation and Stability* 98 (5):927-933. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2013.03.003>
- [14] Gao C, Wang L, Lei Z, Yang L, Xu X, Guo X (2017) Property of intrinsic flame retardant epoxy resin cured by functional magnesium organic composite salt and diethylenetriamine. *Fire Materials* 41 (2):180-192. <https://doi.org/10.1002/fam.2377>
- [15] Weil ED, Zhu W, Patel N, Mukhopadhyay SM (1996) A systems approach to flame retardancy and comments on modes of action. *Polymer Degradation and Stability* 54 (2-3):125-136. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(96\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(96)00036-5)
- [16] Wang X, Kalali EN, Wan J-T, Wang D-Y (2017) Carbon-family materials for flame retardant polymeric materials. *Progress in Polymer Science* 69:22-46. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.02.001>
- [17] Nelson GL (1995) Fire and polymers: An overview. *Fire and Polymers II* ss 1-26.
- [18] Sinha Ray S, Kuruma M (2020) Flame-retardancy testing. In: *Halogen-Free Flame-Retardant Polymers*. Cham: Springer International Publishing ss 11-14.
- [19] Weil ED, Patel NG, Said MM, Hirschler MM, Shakir S (1992) Oxygen index: Correlations to other fire tests. *Fire and Materials* 16 (4):159-167. <https://doi.org/10.1002/fam.810160402>
- [20] Wan L, Deng C, Zhao Z-Y, Chen H, Wang Y-Z (2020) Flame retardation of natural rubber: strategy and recent progress. *Polymers* 12 (2):429. <https://doi.org/10.3390/polym12020429>
- [21] Akkurt S (2007) Plastik malzeme bilimi teknolojisi ve kalıp tasarımı. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [22] Erdem S (2008) Çatıda kullanılan polimer kökenli levhaların karşılaştırmalı analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ, İstanbul, Turkey.
- [23] Lomakin SM, Zaikov GE (2003) Modern polymer flame retardancy. *VSP Vol. 16*.
- [24] Öz MK (2006) Yanmaya karşı dirençli (FR) ve katyonik boyalarla boyanabilen (CD) polyester üretimi ve bu polyesterin elyaf prosesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Turkey.
- [25] Marti J, Idelsohn SR, Oñate E (2018) A finite element model for the simulation of the UL-94 burning test. *Fire Technology* 54 (6):1783-1805. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0769-0>
- [26] Morgan AB, Bundy M (2007) Cone calorimeter analysis of UL-94 V-rated plastics. *Fire Materials: An International Journal* 31 (4):257-283. <https://doi.org/10.1002/fam.937>
- [27] Group P (2020) https://www.pegotester.com/horizontal_and_vertical_flame_test_UL94.html. Erişim 26 Haziran 2022.

- [28] Prime RB, Bair HE, Vyazovkin S, Gallagher PK, Riga A (2009) Thermogravimetric analysis (TGA). *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals Applications* ss 241-317.
- [29] Kobal A (2017) Karakterizasyon teknikleri. malzeme üretim laboratuvarı II <https://silo.tips/download/karakterizasyon-teknikleri-malzeme-retim-laboratuvar-ii>. Erişim 26 Haziran 2022.
- [30] Hüseyin A, Üreyen ME, Kılıç A, Sağlam AE, Demir A (2019) Güç tutuşur polipropilen polimeri ve lif uygulamalarında son gelişmeler ve gelecek beklentileri, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 24 (2):609-632. <https://doi.org/10.17482/uumfd.479415>
- [31] Mack AG (2004) Flame retardants, halogenated. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, (Ed.). <https://doi.org/10.1002/0471238961.0801121516052020.a01.pub2>
- [32] Morose G (2006) An overview of alternatives to tetrabromobisphenol A (TBBPA) and hexabromocyclododecane (HBCD). Lowell Center for Sustainable Production, University of Massachusetts, Lowell. <http://sustainableproduction.org/downloads/AternativestoTBBPAandHBCD.pdf>
- [33] Kaya M, Oz D (1999) Mineral esaslı alev geciktirici ve duman bastına katkı maddeleri. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, Türkiye*, 14-15.
- [34] Acton QA (2013) Heavy metals. *Advances in Research and Application: 2013 Edition*.
- [35] Chen X, Jiao C, Wang Y (2009) Synergistic effects of iron powder on intumescent flame retardant polypropylene system. *Express Polymer Letters* 3 (6):359-365. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2009.45>
- [36] Hollingbery L, Hull TR (2010) The fire retardant behaviour of huntite and hydromagnesite–A review. *Polymer Degradation and Stability* 95 (12):2213-2225. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.08.019>
- [37] Aydın DY, Gürü M, Ayar B, Çakanyıldırım Ç (2016) Bor bileşiklerinin alev geciktirici ve yüksek sıcaklığa dayanıklı pigment olarak uygulanabilirliği. *Journal of Boron* 1 (1):33-39.
- [38] Zhang G, Lin X, Zhang Q, Jiang K, Chen W, Han D (2020) Anti-flammability, mechanical and thermal properties of bio-based rigid polyurethane foams with the addition of flame retardants. *RSC Advances* 10 (53):32156-32161. <https://doi.org/10.1039/D0RA06561G>
- [39] Morgan AB, Wilkie CA (2014) *Non-halogenated flame retardant handbook*. 1st Edition, Wiley-Scrivener, New Jersey, ABD.
- [40] Le Bras M (2005) *Fire retardancy of polymers: new applications of mineral fillers*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
- [41] Murphy J (2001) Chapter 10-modifying specific properties. Flammability -flame retardants. In: J. Murphy, editor. *Additives for Plastics Handbook (Second Edition)*. Amsterdam: Elsevier Science, ss 115-140.
- [42] Zhang J, Hereid J, Hagen M, Bakirtzis D, Delichatsios MA, Fina A, Castrovinci A, Camino G, Samyn F, Bourbigot S (2009) Effects of nanoclay and fire retardants on fire retardancy of a polymer blend of EVA and LDPE. *Fire Safety Journal* 44 (4):504-513. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.10.005>
- [43] Chen X, Yu J, Guo S (2006) Structure and properties of polypropylene composites filled with magnesium hydroxide. *Journal of Applied Polymer Science* 102 (5):4943-4951. <https://doi.org/10.1002/app.24938>

- [44] Ai L, Chen S, Zeng J, Yang L, Liu P (2019) Synergistic flame retardant effect of an intumescent flame retardant containing boron and magnesium hydroxide. *ACS Omega* 4 (2):3314-3321. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03333>
- [45] Dede M (2016) Dopo içeren monomerlerin sentezi, karakterizasyonu ve poliester, poliüretan formülasyonunda kullanılarak alev geciktirici özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [46] Horacek H, Grabner R (1996) Advantages of flame retardants based on nitrogen compounds. *Polymer Degradation and Stability* 54 (2-3):205-215. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(96\)00045-6](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(96)00045-6)
- [47] Levchik SV, Weil ED (2008) New developments in flame retardancy of styrene thermoplastics and foams. *Polymer international* 57 (3):431-448. <https://doi.org/10.1002/pi.2282>
- [48] Liang S, Neisius NM, Gaan S (2013) Recent developments in flame retardant polymeric coatings. *Progress in Organic Coatings* 76 (11):1642-1665. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.07.014>
- [49] Laoutid F, Bonnaud L, Alexandre M, Lopez-Cuesta J-M, Dubois P (2009) New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 63 (3):100-125. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2008.09.002>
- [50] Deng C-L, Du S-L, Zhao J, Shen Z-Q, Deng C, Wang Y-Z (2014) An intumescent flame retardant polypropylene system with simultaneously improved flame retardancy and water resistance. *Polymer Degradation and Stability* 108:97-107. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.06.008>
- [51] Zhu ZM, Wang LX, Lin XB, Dong LP (2019) Synthesis of a novel phosphorus-nitrogen flame retardant and its application in epoxy resin. *Polymer Degradation and Stability* 169:108981. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.108981>
- [52] Hu XP, Li WY, Wang YZ (2004) Synthesis and characterization of a novel nitrogen-containing flame retardant. *J. Appl. Polym. Sci.* 94 (4):1556-1561. <https://doi.org/10.1002/app.20792>
- [53] Qian X, Song L, Bihe Y, Yu B, Shi Y, Hu Y, Yuen RKK (2014) Organic/inorganic flame retardants containing phosphorus, nitrogen and silicon: Preparation and their performance on the flame retardancy of epoxy resins as a novel intumescent flame retardant system. *Materials Chemistry and Physics* 143 (3):1243-1252. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.11.029>
- [54] Wang C, Wu Y, Li Y, Shao Q, Yan X, Han C, Wang Z, Liu Z, Guo Z (2018) Flame-retardant rigid polyurethane foam with a phosphorus-nitrogen single intumescent flame retardant. *Polym Adv. Technol.* 29 (1):668-676. <https://doi.org/10.1002/pat.4105>
- [55] Zheng T, Wang W, Liu Y (2021) A novel phosphorus-nitrogen flame retardant for improving the flame retardancy of polyamide 6: Preparation, properties, and flame retardancy mechanism. *Polymers for Advanced Technologies* 32 (6):2508-2516. <https://doi.org/10.1002/pat.5281>
- [56] Xie C, Zeng B, Gao H, Xu Y, Luo W, Liu X, Dai L (2014) Improving thermal and flame-retardant properties of epoxy resins by a novel reactive phosphorous-containing curing agent. *Polymer Engineering & Science* 54 (5):1192-1200. <https://doi.org/10.1002/pen.23642>

- [57] Liu YL (2001) Flame-retardant epoxy resins from novel phosphorus-containing novolac. *Polymer* 42 (8):3445-3454. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00717-5](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00717-5)
- [58] Velencoso MM, Battig A, Markwart JC, Schartel B, Wurm FR (2018) Molecular firefighting-how modern phosphorus chemistry can help solve the challenge of flame retardancy. *Angew Chem Int Ed Engl* 57 (33):10450-10467. <https://doi.org/10.1002/anie.201711735>
- [59] Stackman RW (1982) Phosphorus based additives for flame retardant polyester. 2. Polymeric phosphorus esters. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development* 21 (2):332-336. <https://doi.org/10.1021/i300006a028>
- [60] Zhang S, Horrocks AR (2003) A review of flame retardant polypropylene fibres. *Progress in Polymer Science* 28 (11):1517-1538. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.09.001>
- [61] Guo W, Cai W, Wang D, Wang J, Zhu X, Fei B (2022) Halogen-free flame retarded poly (lactic acid) with an isosorbide-derived polyphosphonate. *Journal of Renewable Materials* 10 (7):1875-1888. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.018823>
- [62] Green J (1992) A review of phosphorus-containing flame retardants. *Journal of Fire Sciences* 10 (6):470-487. <https://doi.org/10.1177/073490419201000602>
- [63] Rulev AY (2014) Recent advances in Michael addition of H-phosphonates. *RSC Advances* 4(49):26002-26012. <https://doi.org/10.1039/C4RA04179H>
- [64] Salmeia KA, Gaan S (2015) An overview of some recent advances in DOPO-derivatives: Chemistry and flame retardant applications. *Polymer Degradation and Stability* 113:119-134. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.12.014>
- [65] Hamciuc C, Vlad-Bubulac T, Serbezeanu D, Carja ID, Hamciuc E, Lisa G, Pérez VF (2016) Environmentally friendly fire-resistant epoxy resins based on a new oligophosphonate with high flame retardant efficiency. *RSC Advances* 6 (27):22764-22776. <https://doi.org/10.1039/C5RA27451F>
- [66] Salmeia KA, Gooneie A, Simonetti P, Nazir R, Kaiser JP, Rippl A, Hirsch C, Lehner S, Rupper P, Hufenus R, Gaan S (2018) Comprehensive study on flame retardant polyesters from phosphorus additives. *Polymer Degradation and Stability* 155:22-34. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.07.006>
- [67] Chi Z, Guo Z, Xu Z, Zhang M, Li M, Shang L, Ao Y (2020) A DOPO-based phosphorus-nitrogen flame retardant bio-based epoxy resin from diphenolic acid: Synthesis, flame-retardant behavior and mechanism. *Polymer Degradation and Stability* 176:109151. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109151>
- [68] Chen L, Wang YZ (2010) Aryl polyphosphonates: useful halogen-free flame retardants for polymers. *Materials* 3(10):4746-4760. <https://doi.org/10.3390/ma3104746>
- [69] Wang P, Chen L, Xiao H (2019) Flame retardant effect and mechanism of a novel DOPO based tetrazole derivative on epoxy resin. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 139:104-113. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.01.015>

- [70] Ranganathan T, Zilberman J, Farris RJ, Coughlin EB, Emrick T (2006) Synthesis and characterization of halogen-free antflammable polyphosphonates containing 4, 4 '-bishydroxydeoxybenzoin. *Macromolecules* 39(18):5974-5975. <https://doi.org/10.1021/ma0614693>
- [71] Fiss BG, Hatherly L, Stein RS, Frišćić T, Moores A (2019) Mechanochemical phosphorylation of polymers and synthesis of flame-retardant cellulose nanocrystals. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 7(8):7951-7959. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00764>
- [72] Ménard R, Negrell-Guirao C, Ferry L, Sonnier R, David G (2014) Synthesis of biobased phosphate flame retardants: Characterization of flame retardancy on epoxy thermosets. *Pure and Applied Chemistry* 86(11):1637-1650. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-0703>
- [73] Vahabi H, Eterradosi O, Ferry L, Longuet C, Sonnier R, Lopez-Cuesta JM (2013) Polycarbonate nanocomposite with improved fire behavior, physical and psychophysical transparency. *European Polymer Journal* 49(2):319-327. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2012.10.031>
- [74] Işıksel E, Kahraman G, Ceren Süer N, Wang DY, Eren T (2019) Synthesis and characterization of phosphonate and aromatic-based polynorbornene polymers derived from the ring opening metathesis polymerization method and investigation of their thermal properties. *Journal of Applied Polymer Science* 136(8):47085. <https://doi.org/10.1002/app.47085>
- [75] Turgut G, Işıksel E, Kahraman G, Eren T, Özkoç G (2018) Synthesis of phosphorus-and phenyl-based ROMP polymers and investigation of their effects on the thermomechanical and flammability properties of a polypropylene-IFR system. *Journal of Applied Polymer Science* 135(11):45998. <https://doi.org/10.1002/app.45998>
- [76] Oktay B, Çakmakçi E (2017) DOPO tethered Diels Alder clickable reactive silica nanoparticles for bismaleimide containing flame retardant thiol-ene nanocomposite coatings. *Polymer* 131:132-142. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.10.043>
- [77] Grubb J, Carosio F, Vasireddy M, Moncho S, Brothers EN, Hobbs CE (2018) Ring opening metathesis polymerization (ROMP) and thio-bromo "click" chemistry approach toward the preparation of flame-retardant polymers. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry* 56(6):645-652. <https://doi.org/10.1002/pola.28939>
- [78] Fan S, Zhu C, Wu D, Wang X, Yu J, Li F (2020) Silicon-containing inherent flame-retardant polyamide 6 with anti-dripping via introducing ethylene glycol as the chain-linker and charring agent. *Polymer Degradation and Stability* 173:109080. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109080>
- [79] Shan F, Ohashi S, Erlichman A, Ishida H (2018) Non-flammable thiazole-functional monobenzoxazines: Synthesis, polymerization, thermal and thermomechanical properties, and flammability studies. *Polymer* 157:38-49. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.09.061>
- [80] Wang X, Niu H, Huang J, Song L, Hu Y (2021) A desoxyanisoin-and furfurylamine-derived high-performance benzoxazine thermoset with high glass transition temperature and excellent anti-flammability. *Polymer Degradation and Stability* 189:109604. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109604>