



KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ

Mühendislik ve
Fen Bilimleri
Dergisi

KIRKLARELİ UNIVERSITY

Journal of
Engineering
and Science

KLUTES

ISSN: 2458-7494 / E-ISSN: 2458-7613

An International Peer Reviewed, Indexed and Open Acces Journal



ISSN : 2458-7494
E-ISSN: 2458-7613

KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

KIRKLARELİ UNIVERSITY
JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

Cilt / Volume: 9

Sayı / Number: 2

Aralık / December 2023

Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/klujes>

e-mail: fbedergi@klu.edu.tr

editor@klu.edu.tr



KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ / KIRKLARELİ UNIVERSITY
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ / JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

Sahibi / Owner

Kırklareli Üniversitesi Rektörlüğü Adına / Owner on Behalf of Kırklareli Rectorship
Prof. Dr. Bülent ŞENGÖRÜR (Rektör)

Baş Editör / Editor in Chief

Doç. Dr. H. Hale KARAYER

Editörler / Editors

Prof. Dr. Erol TÜRKEŞ

Doç. Dr. Burak ÖZŞAHİN

Doç. Dr. M. Mehmet KOÇ

Doç. Dr. Soner YELER

Doç. Dr. Nurdan KURNAZ YETİM

Dr. Öğr. Üyesi Erdiñ KESKİN

Dr. Öğr. Üyesi Merve ERMİŞ

Dr. Öğr. Üyesi Ufuk PAKSU

Yayın Kurulu / Editorial Board

Prof. Dr. Bülent ŞENGÖRÜR

Prof. Dr. Meryem ÇAMUR

Prof. Dr. Serpil AKÖZCAN PEHLİVANOĞLU

Doç. Dr. H. Hale KARAYER

Doç. Dr. Burak ÖZŞAHİN

Doç. Dr. Soner YELER

Doç. Dr. Sencer Süreyya KARABEYOĞLU

Dr. Öğr. Üyesi Erdiñ KESKİN

Dr. Öğr. Üyesi Merve ERMİŞ

Dr. Öğr. Üyesi Ufuk PAKSU

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Editing Manager

Erhan AYZ

İnternet Adresi / Web Address

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/klujes>

Yazışma Adresi / Correspondence Address

Kırklareli Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

Rektörlük Kültür Merkezi B Blok Merkez/ Kırklareli

e-mail: fbedergi@klu.edu.tr

Tel: 0 (288) 246 15 16

Fax: 0 (288) 246 16 02

Baskı / Publisher

Kırklareli Üniversitesi Matbaası / Kırklareli University Publishing Centre

Yayın Türü / Publication Type

Yaygın Süreli Yayın / International Periodical

Yılda iki kez yayınlanır: Haziran, Aralık / Twice a year: June, December

Basım Tarihi / Publication Date: 31.12.2023



KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ / KIRKLARELİ UNIVERSITY
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ / JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

Danışma Kurulu / Advisory Board

Abdurrahman GÜNER, İstanbul Esenyurt Üniversitesi, İstanbul
A. Fevzi BABA, Marmara Üniversitesi, İstanbul
A. Sabih ATADAN, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Aleksandar GEORGIEV, Sofya Teknik Üniversitesi, Bulgaristan
Asım KURTOĞLU, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Bilal BALKAN, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Bülent AKBAŞ, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli
Bülent ŞENGÖRÜR, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Deris STIAWAN, Sriwijaya University, Endonezya
Emrah DOĞAN, Sakarya Üniversitesi, Sakarya
Erhan BUDAK, Sabancı Üniversitesi, İstanbul
Erol TÜRKEŞ, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Fahri VATANSEVER, Uludağ Üniversitesi, Bursa
F.Onur HOCAOĞLU, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar
Gökhan GÖKMEN, Marmara Üniversitesi, İstanbul
Göksel DEMİR, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Hasan DEMİR, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ
Hatice ŞANLIDERE ALOĞLU, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
İsmail KIYAK, Marmara Üniversitesi, İstanbul
Kadir GÜLER, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
Kanat Burak BOZDOĞAN, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale
Kamil KAHVECİ, Trakya Üniversitesi, Edirne
Lambros EKONOMOU, Hellenic American University, Yunanistan
M. Hakan HOCAOĞLU, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli
Meryem ÇAMUR, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
M.S. Bhaskar RANJANA, Marathwada Institute of Technology, Hindistan
Murat BOSTANCIOĞLU, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas
Murat KARAHAN, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya
Mustafa BİRİNCİ, İnönü Üniversitesi, Malatya
Nadide SEÇKİN, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Oğuzhan ERBAŞ, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya
Osman KILIÇ, Marmara Üniversitesi, İstanbul
Osman Nuri UÇAN, İstanbul Kemerburgaz Üniversitesi, İstanbul
Özlem AYTEKİN, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Ramazan ÇAĞLAR, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
Sarp ERTÜRK, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli
Serpil AKÖZCAN PEHLİVANOĞLU, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli
Sezai TAŞKIN, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa
Veselina NEDEVA, Trakya Üniversitesi, Bulgaristan
Yılmaz ÇAN, Trakya Üniversitesi, Edirne
Youcef SOUFI, University of Tébessa, Cezayir
Yunus BİÇEN, Düzce Üniversitesi, Düzce
Yüksel OĞUZ, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar
Zafer AĞDELEN, Girne Amerikan Üniversitesi, KKTC
Witold CHARATONIK, University of Wroclaw, Polonya



KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ / KIRKLARELİ UNIVERSITY
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ / JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

İçindekiler / Contents

Tevfik GEMCİ ; FLUE GAS DESULFURIZATION SCRUBBERS IN HEAVY DIESEL COMBUSTION PLANTS (<i>Research</i>).....	237-253
Gülten YILMAZ ; COMPARISON OF DIFFERENT METHODS FOR OPTIMIZATION OF PID CONTROLLER GAIN COEFFICIENTS (<i>Research</i>).....	254-264
Aytuğ BECENEN, Gürkan TUNA ; SIMULATION OF KINEMATIC AND DYNAMIC MODEL OF TWO DEGREES OF FREEDOM ROBOT ARM USING SIMULINK (<i>Research</i>).....	265-280
Burhan CEYLAN, Sergun DAYAN, Eda AYDIN ; INVESTIGATION OF ANTI-ALZHEIMER AND ANTI-DIABETIC ACTIVITY OF CALLUS CULTURE OF BELLEVALIA EDIRNENSIS ÖZHATAY & MATHEW AN ENDEMIC PLANT FROM TURKEY (<i>Research</i>).....	281-288
Chinnaraji ANNAMALAI, Özen ÖZER ; A DIFFERENT PERSPECTIVE FOR GEOMETRIC SERIES WITH BINOMIAL COEFFICIENTS (<i>Research</i>).....	289-299
Ece ZAIMOĞLU KUŞÇU, Nihat AKTAÇ, Yılmaz ÇAMLITEPE ; VERTICAL DISTRIBUTION OF ANTS (HYMENOPTERA FORMICIDAE) IN GANOS (IŞIK) MOUNTAINS (<i>Research</i>).....	300-316
Kader NİKBAY OYLUM, Kenan SELÇUK, Turgay Tugay BİLGİN ; ENHANCING ENERGY EFFICIENCY AND REAL-TIME MONITORING IN INDUSTRIAL ENVIRONMENTS THROUGH AN INTEGRATED SOFTWARE SOLUTION NIGHTWATCH (<i>Research</i>).....	317-329
Fürüzan ÇELİK, Yaşar MENTEŞ, Oğuz ATEŞ ; URBAN AGRICULTURE APPROACH IN THE DEVELOPMENT OF SUSTAINABLE CITIES THE CASE OF ELAZIĞ, TÜRKİYE (<i>Research</i>).....	330-350
Fadime Menekşe İKBAL, Oğuzhan ERBAŞ, Özer AYDIN ; ENERGY TRANSFER PROCESS AND PROCESS GAS FLOW MODEL IN NITRIC ACID PRODUCTION (<i>Research</i>).....	351-368
Hossein Zorriyeh ALIGHOLI, Onur YAVAN ; THE EFFECT OF TUNNELING ON THE PILED FOUNDATION IN LAYERED SOILS (<i>Research</i>).....	369-380
Nurdan KURNAZ YETİM, Elvan HASANOĞLU ÖZKAN, Nihat AKKURT, Cemile ÖZCAN ; DETERMINATION AND SPECIATION OF Cd(II) AND Pb(II) IONS USING MAGNETIC SOLID PHASE EXTRACTION BY FLAME ATOMIC ABSORPTION SPECTROSCOPY (<i>Research</i>).....	381-396
Abtullah TUĞCU ; PVSYST SİMÜLASYON ARACI KULLANILARAK KÜTAHYA DÜMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ TAVŞANLI YERLEŞKESİ ŞEBEKE BAĞLANTILI GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİNİN TASARIMI VE EKONOMİK ANALİZİ (<i>Araştırma</i>).....	397-417



KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ / KIRKLARELİ UNIVERSITY
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ DERGİSİ / JOURNAL of ENGINEERING and SCIENCE

İçindekiler / Contents

Hande NURYADI, Burak ÖZŞAHİN; ÇELİK VE KARMA TAŞIYICI SİSTEMLİ SANAYİ BİNA ÖRNEKLERİNİN KABA YAPIM MALİYETLERİNİN TRAKYA BÖLGESİ İÇİN KARŞILAŞTIRILMASI (<i>Araştırma</i>).....	418-442
Bilal BALKAN, Seda BALKAN; TOKSİYENİK ASPERGILLUS FLAVUS'UN BÜYÜMESİN; KONTROL ETMEK İÇİN THYMUS LONGICAULIS'IN DEĞERLENDİRİLMESİ (<i>Araştırma</i>).....	443-453
İsmail KOYUNCU, Fatih KARATAŞ, Murat ALÇIN, Murat TUNA; VHDL İLE NIBP, SpO2 VE ETCO2 YAŞAMSAL SİNYALLERİN FPGA TABANLI TASARIMI VE GERÇEK ZAMANLI UYGULAMASI (<i>Araştırma</i>).....	454-468
Ebru EFEÖĞLU; BULANIK MANTIK ALGORİTMALARI İLE KAYA SINIFLANDIRMASI (<i>Araştırma</i>).....	469-477
Esmâ MIHLAYANLAR, Sinan MERAL; MEVCUT BİNALARDA ENERJİ VERİMLİ YENİLEME VE EKB UYGULAMASI (<i>Araştırma</i>).....	478-497
Samet Giray TUNCA, Abdullah AKBULUT; SİNERJİ MANTIK ÜRETİMİ DÖNER FIRININDAKİ ATIK ISININ KOJENERASYON SİSTEM PERFORMANSI VE EKONOMİK ANALİZİ (<i>Araştırma</i>).....	498-515
Samet Giray TUNCA, Mustafa Arif ÖZGÜR; SESALTI RÜZGAR TUNELİNDE KANAT AERODİNAMİĞİ KUVVET VE AKIŞ GÖRÜNTÜLEME ANALİZLERİ (<i>Araştırma</i>).....	516-527
İlker ŞAHİNOĞLU, Kanat Burak BOZDOĞAN; BALASTLI DEMİRYOLU HATLARININ STATİK ANALİZİNDE DİFERANSİYEL DÖNÜŞÜM YÖNTEMİNİN UYGULANMASI (<i>Araştırma</i>).....	528-539
Ecem BAYRAKTAR, Harun URAN; SU ÜRÜNLERİNDE HİSTAMİN OLUŞUMU VE ÖNEMİ (<i>Derleme</i>).....	540-551
Melih CANLIDİNÇ; TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU İLE METAL EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI (<i>Derleme</i>).....	552-565

Flue Gas Desulfurization Scrubbers in Heavy Diesel Combustion Plants

Tevfik Gemci^{1*} 

¹Synergy CFD Consulting LLC, 1250 S Rainbow Blvd, Las Vegas, NV 89146, USA

Received: 16.05.2023, Accepted: 20.12.2023, Published: 31.12.2023

ABSTRACT

Through the purification technology of flue gas desulfurization, ultralow emissions of SO₂ flue gas in industrial flue gas can be achieved. In this article, wet flue gas desulfurization (FGD) processes using limestone (calcium carbonate CaCO₃) and caustic (sodium hydroxide NaOH) as absorption solutions are introduced in terms of fluid mechanics and mass transfer phenomena as well as absorption unit processes. Also, initial investment and operation costs are compared for wet flue gas desulfurization processes using limestone and caustic.

Keywords: Flue gas desulfurization; Wet desulfurization process; Fluid mechanics; Mass transfer; Absorption unit processes

Ağır Dizel Yakma Tesislerinde Atık Gaz Kükürt Giderme Üniteleri

ÖZ

Baca gazı kükürt giderme saflaştırma teknolojisi sayesinde, endüstriyel baca gazında son derece düşük SO₂ baca gazı emisyonları elde edilebilir. Bu makalede absorpsiyon çözültisi olarak kireç taşı (kalsiyum karbonat CaCO₃) ve kostik (sodyum hidroksit NaOH) kullanan ıslak kükürt giderme prosesleri, absorpsiyon ünitesi proseslerinin yanı sıra akışkanlar mekaniği ve kütle transferi fenomenleri açısından tanıtılmaktadır. Ayrıca kireçtaşı ve kostik kullanılan ıslak baca gazı kükürt giderme proseslerinin ilk yatırım ve işletme maliyetleri karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık gaz kükürt giderme; Islak kükürt giderme prosesi; Akışkanlar mekaniği, Kütle transferi; Absorpsiyon ünite işlemleri

1. INTRODUCTION

As a result of the combustion of high-sulfur fossil fuels in cogeneration and diesel engines or steam boiler plants, flue (waste) gas containing SO₂ is released. SO₂ emissions are known to have detrimental impacts on human health and the environment [33]. On the other hand, waste gas containing SO₂ must be passed through a flue gas treatment unit before it is released into the atmosphere, thus preventing acid rains that may reach the earth. Separation of sulfur dioxide (SO₂) from the flue gas is possible by dry or wet absorption processes using alkaline absorption solutions [1-4, 6, 20]. It is obligatory to treat other flue gases from combustion processes and heavy metals and ashes in the fuel up to the permissible emission values [7, 17]. Many clinical studies have shown that the correlation between atmospheric air pollutants (including acid aerosols and sulfates) and respiratory diseases is highly complicated [27-29]. The serious health concerns associated with exposure to high SO₂ concentration include breathing difficulty, respiratory illness, and aggravation of existing cardiovascular disease [33]. Strong inorganic acid mists containing sulfuric acid (H₂SO₄) have been reported to correlate with lung and laryngeal cancer in humans [30-32].

As is known, wet, dry, and semi-wet processes are used for SO₂ removal [7]. In this article, wet systems, which are seen as the most suitable solution for Turkish situations, will be examined. The final products resulting from the dry process are rarely or only obtained as usable raw materials at great expense. The end products from dry absorption plants are sometimes only sent to a solid waste warehouse, but often to a hazardous solid waste warehouse, resulting in increased waste disposal costs. On the other hand, the use of excess absorption solution, which adversely affects operating costs, should be reduced as much as possible in providing the sulfur dioxide emission value limited by the emission regulation. The use of excess absorption solution will eventually considerably increase the amount of end product that must be further disposed of. For this reason, dry systems that use a large amount of absorption agent as a process requirement are not very attractive.

This paper analyses the advantages and disadvantages of two wet FGD scrubbers to their environmental and financial aspects. Total costs of FGD systems include both capital and annualized costs. The major capital cost components of an FGD system consist of plant equipment, installation, site development, and indirect costs. In the FGD scrubber market throughout the world, wet FGD limestone scrubbers take the lead, the byproduct of which is a marketable gypsum. Most of the second wet FGD scrubbers cover a similar process but produce a disposal product (waste).

2. WET FLUE GAS DESULFURIZATION PROCESSES

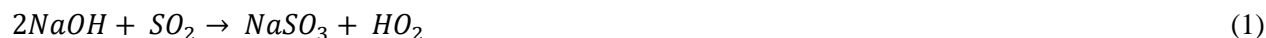
Two groups of absorption solutions for the wet FGD absorption process are widely used [1-4, 6-12, 24-25]:

- Sodium hydroxide (caustic) or sodium carbonate, where a diluted solution or a crystalline sodium sulfate/sulfite mixture is formed as the final substance or
- Calcium oxide (lime), calcium hydroxide (slaked lime), or calcium carbonate (limestone); here, the final product is exposed as gypsum raw material.

In this article, both alternative processes will be examined in detail.

2.1. Wet FGD process with caustic or sodium carbonate

If these absorption solutions are used in the absorption of sulfur dioxide, sodium sulfide (Na_2SO_3) is formed in the first step in the absorption solution. The caustic soda (NaOH) slurry can produce Na_2SO_3 by Eq. (1) which can be further oxidized by Eq. (2) to produce marketable Na_2SO_4 (sodium sulfate) by Eq. (3) [14]:



At the same time, heavy metals such as vanadium and nickel and soot particles in the waste gas are retained during washing and pass into the absorption solution. As a result of the excess oxygen present in the flue gas in the absorption zone of the washer, some sodium sulfite is oxidized and turns into soluble sodium sulfate again. To complete the oxidation of the remaining sodium sulfite, air must be blown into the solution at the bottom of the washer with the help of a blower fan. Another alternative is to complete this oxidation process with air in a separate tank. In both systems, it is not possible to obtain sodium sulfate by performing a perfect oxidation. In any case, up to 20% sodium sulfide can be found in the discarded washing solution. It is also not possible to deliver this amount of sodium sulfide, which is toxic and fatal for living creatures in the receiving environment, to a wastewater treatment plant.

The washing solution contains some toxic sodium sulfide, as well as heavy metals and soot/particles retained during washing. For this reason, a precaution must be taken to separate these heavy metals from the washing solution. Likewise, the soot/particles that pass into the solution during washing should be separated and removed by a filtering device. Even if the sulfide is completely converted to sulfate, the resulting sulfate concentration is well above the permissible value. It is forbidden to give sulfate to the receiving environment at this rate, and it cannot be discharged into a sewer system as it will destroy the concrete. A crystallization process is required so that the sodium sulfate formed can be used as a raw

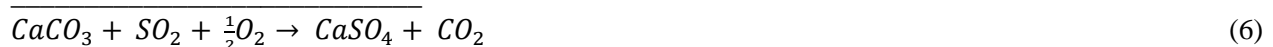
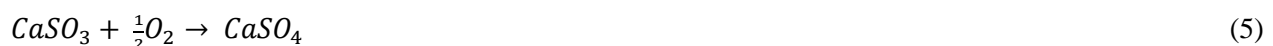
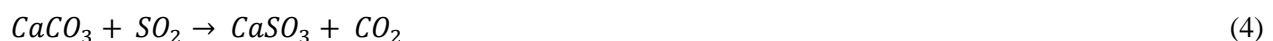
material, for example in glass production. Again, in this case, it is necessary to separate heavy metals and soot/particles. Because soot/particles and heavy metals cause undesirable color changes on the glass. Crystallization is mainly achieved by cooling/evaporation crystallization or by evaporation of the waste washing solution in a spray dryer with hot waste gas. The spray dryer is followed by a bag filter. The crystallization process with these two techniques causes additional investment and operating costs, as well as a very serious increase in operating effort.

Also, caustic or sodium carbonate is much more expensive than calcium-based sorbents. Chemical consumption, on the other hand, significantly affects the operating costs of desulfurization plants. This issue is explained in more detail in the section on operating cost comparison. Due to the disadvantages mentioned here, the wet absorption process with sodium hydroxide (caustic) or sodium carbonate for the removal of sulfur dioxide from the flue gases of combustion plants has little use and can only be used in small power plants. Fig. 1 adapted from [2, 11] shows the simplified process flow diagram of flue gas desulfurization and wastewater treatment with sodium hydroxide/sodium carbonate.

2.2. Wet FGD process with calcium-based alkalis

Because of the many disadvantages of wet absorption of sulfur dioxide with caustic or sodium carbonate, almost all desulfurization plants today use cheaper calcium-based alkalis as absorption solutions. As a first step in this process, either partially soluble calcium hydrogen sulfide or sparingly soluble calcium sulfide is formed. The limestone-forced oxidation (LSFO) of calcium hydrogen sulfide to insoluble calcium sulfate (gypsum) begins with the excess oxygen in the flue gas in the absorption zone of the washer [1-2, 6, 9-10]. LSFO is a newer process based on wet limestone scrubbing which reduces scale. In LSFO, air is added by a blower fan to the reaction tank which oxidizes the spent slurry to gypsum [23]. Since the reaction product gypsum is removed as a continuous solid based on mass balance, a high oxidation rate is still reached in the absorption zone. The remaining oxidation is provided by the introduction of air into the liquid solution at the bottom of the washer using a blower fan. Thus, perfect oxidation is achieved. This process is very important for the released gypsum to be used as raw material [6]. Fig. 2 adapted from [2, 9-10] shows a simplified flow chart of a lime flue gas desulfurization plant with gypsum raw material as the final product.

The reactions that take place in wet absorption with calcium components are briefly represented by Eq. (4-6) in the example of calcium carbonate CaCO_3 (limestone) [1-2, 6]:



The gypsum (CaSO_4) formed during absorption is present as a solid in the washing solution and is continuously separated and dewatered in a filter press, vacuum band filter, or drum filter. The amount of residual water (moisture) in the dewatered gypsum is around 10% and does not constitute any obstacle to its use as raw material. The only thing to be considered is that heavy metals coming from the fuel, such as nickel and vanadium, in the filter permeate water that does not contain any other toxic and harmful substance (such as sulfate) are precipitated by a simple chemical treatment.

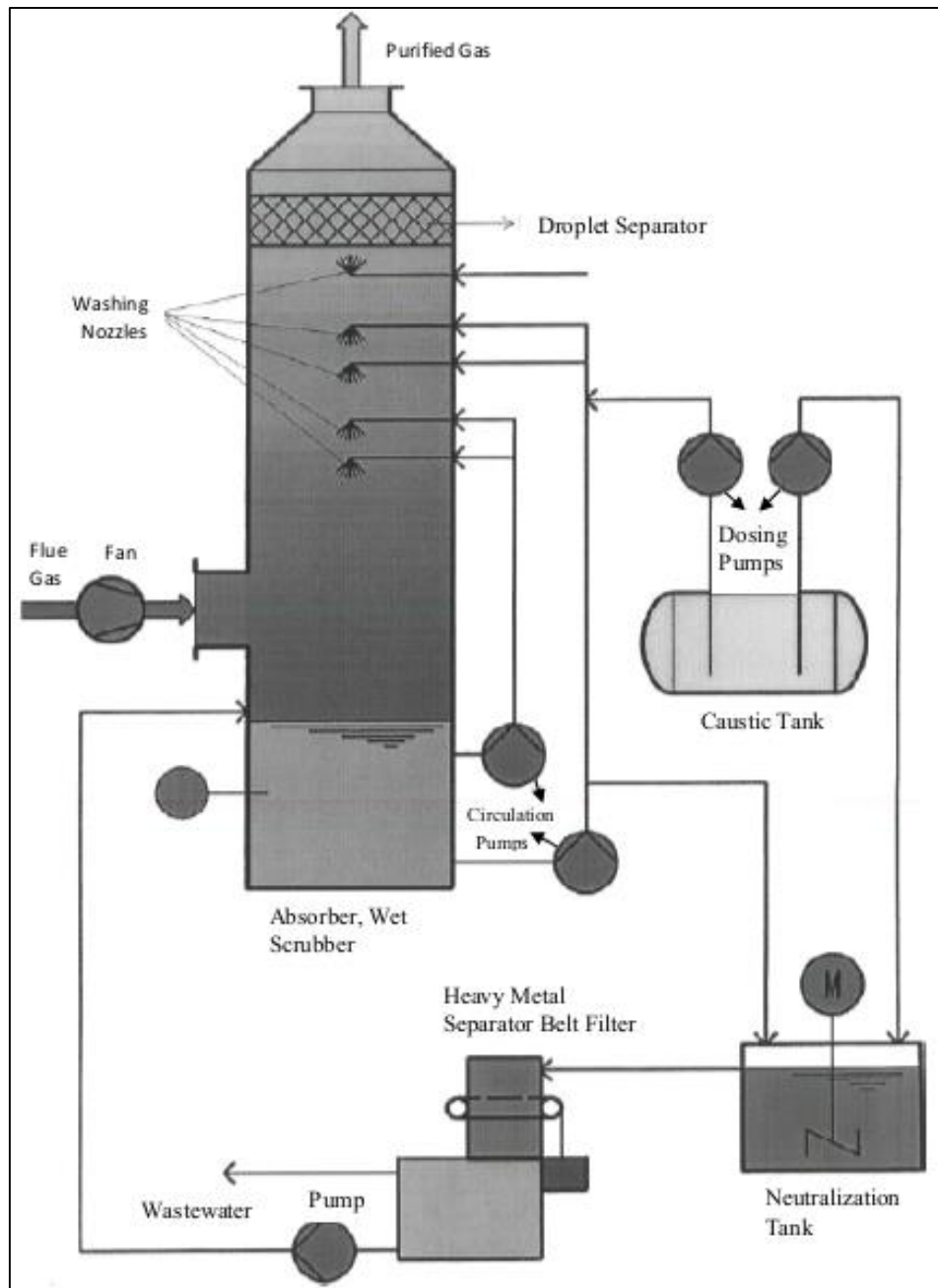


Figure 1: Simplified process flow chart of flue gas desulfurization and wastewater treatment (heavy metal) with sodium hydroxide (caustic) which is adapted from [2, 11].

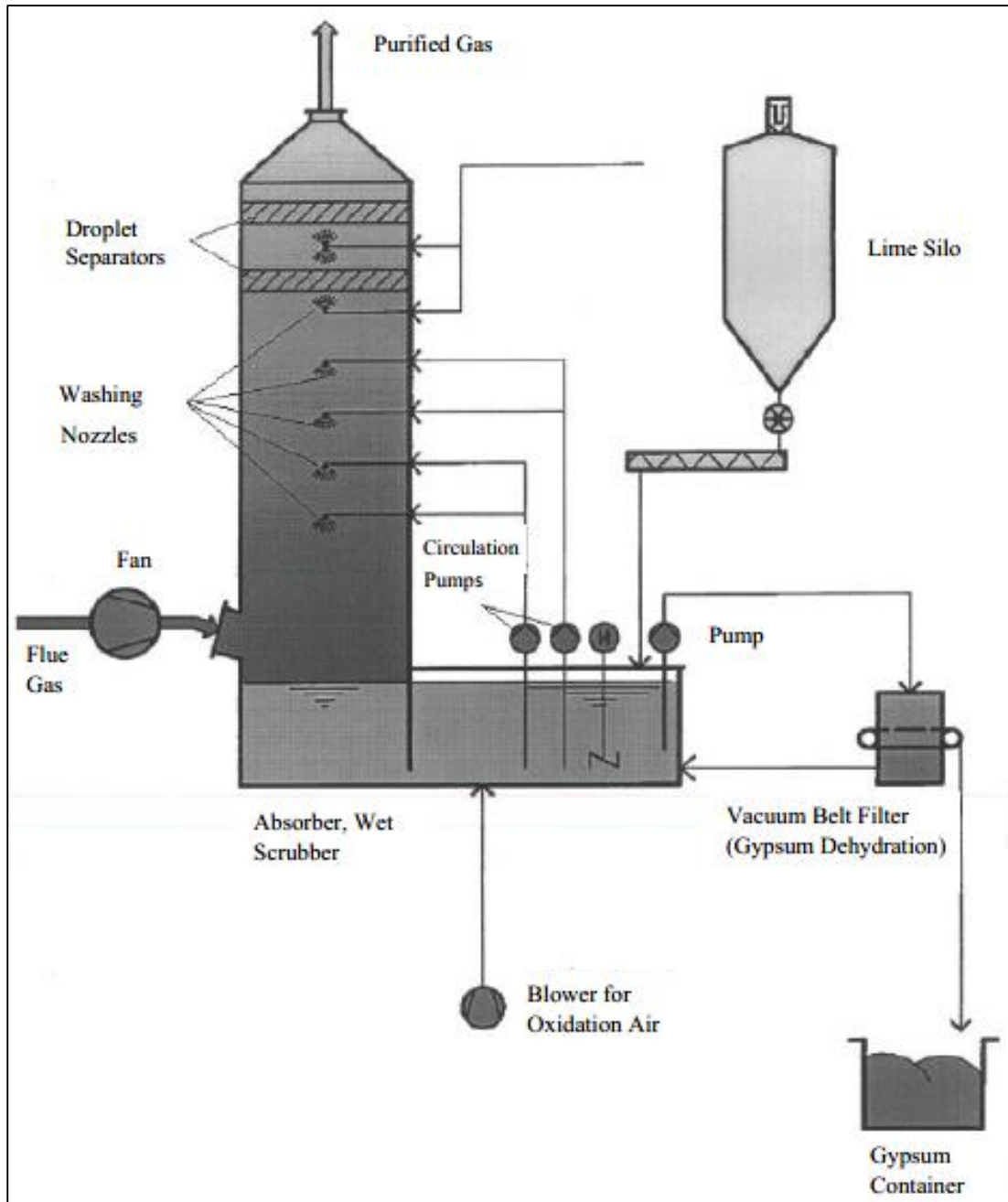


Figure 2: Simplified process flow chart of a lime flue gas desulfurization plant with gypsum raw material as the final product which is adapted from [2, 9-10, 20].

The permeate water, which is purified from heavy metals, is fed back to the absorption plant as a rewashing solution and in this way a closed cycle is provided. In this process, there is no wastewater that must be treated and removed. The soot/particles in gypsum do not affect the use of gypsum as a raw material in the cement industry. The flue gas problem in the capture of sulfur dioxide with calcium

compounds does not create a new environmental problem. On the contrary, a raw material (gypsum) that has no wastewater problem and has economic value emerges [6-7].

3. FACILITY FEATURES

3.1. Wet FGD scrubber with sodium hydroxide/carbonate

The flue gas desulfurization plant based on sodium hydroxide or sodium carbonate mainly consists of the following equipment [2, 9-10].

- Washer (with circulation/reaction tank and droplet trap)
- Circulation pumps
- Chemical tank and dosage unit
- Purification of wastewater

The washer system is generally designed in two ways either filled (packed tower) washer/scrubber or unfilled washer/scrubber type. The advantage of the filled washer/scrubber over the unfilled washer/scrubber is that it has a smaller diameter washer due to the filler material and therefore a larger contact surface [9, 15]. However, in the filled type of washer/scrubber, the ash/particles in the flue gas accumulate on the filling material and cause the risk of clogging. Cleaning the filling materials costs a lot of money. This is why the electric power plant, or the motors will have to be out of order frequently.

On the other hand, the initial investment cost of the filled washer/scrubber remains at the same level as the unfilled washer/scrubber due to the cost of the filling material, despite its smaller size [15]. Stainless steel, plastic materials, rubber-coated steel, or plastic-coated concrete washers/scrubbers can be used as washer/scrubber material. If stainless steel material is used, the chloride in the washing solution passing from the feed water to the system causes corrosion and wear. Therefore, the use of stainless steel is limited to some special cases. The initial investment cost of a stainless-steel washer/scrubber may equal the cost of washers/scrubbers made of other materials, depending on the appropriate price of the stainless steel to be used.

Due to the risk of corrosion, plastic scrubbers, rubber-coated steel, or plastic-coated concrete scrubbers are often used in flue gas treatment plants. Their initial investment cost is as high as stainless steel washers. Of these washers, the lowest initial investment cost is plastic-coated concrete washers, followed by plastic washers and rubber-coated steel washers. Concrete type washer has great advantages over other systems due to both operational safety and initial investment cost advantages. Concrete is protected against corrosion by mechanically fixing plastic plates to the concrete. The mounting of the plastic plates to the washer is done at the construction site, thus eliminating huge transportation work. Plastic plates are mounted together with the concrete as an inner wall. Then, each plate is welded on top of each other at the joints. If a possible leaking problem occurs during operation, it can simply be repaired locally. Fig. 3

shows the scheme of covering concrete with a Bekaplast plastic plate [8]. PP, PE, PVC, or PVDF are used as plate material.

A droplet trap is mounted on the upper outlet side of the washer, which allows the holding of small droplets carried by the gas flow. Since the flue gas is carried in solid particles, the particles are kept in the droplet holder. On the other hand, the droplet trap is equipped with a water spray system. Thus, solid particles are removed with the occasional spray water, and clogging is prevented. Chemically resistant pumps are used as circulation pumps and the washing solution is continuously pumped into the absorption zone. The spray nozzles mounted on the pump delivery line ensure that the washing solution is distributed homogeneously to the cross-sectional area in the washer absorption zone and sprayed. Since the spray nozzles do not contain internally connected parts, the danger of clogging is thus eliminated.

The absorption agent is circulated from the chemical storage tank to the washing solution depending on the pH value of the washing solution. In this way, the pH value of the washing solution is kept in the weak acid range and the chemical consumption is reduced as much as possible. The sodium sulfate/sodium sulfite solution formed during SO₂ capture is withdrawn from the system depending on the dosed chemical amount and sent to wastewater treatment. This treatment system requires a high-cost advanced treatment process as described above [1, 9, 20].

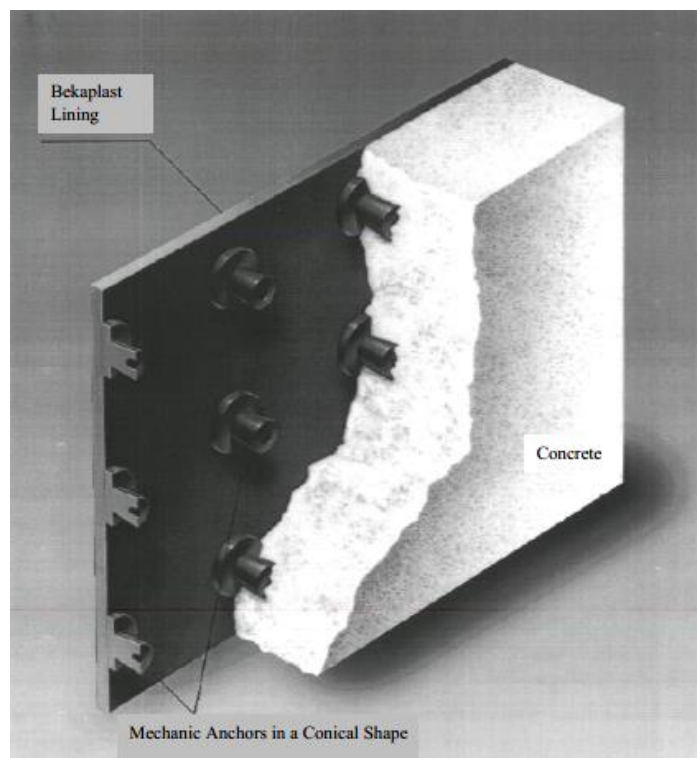


Figure 3: Covering concrete with plastic plate [8].

3.2. Wet FGD scrubber with calcium-based alkalis

By using calcium oxide (lime), calcium hydroxide (slaked lime), or calcium carbonate (limestone) as the absorption solution, gypsum is formed as a solid material in flue gas desulfurization and only unfilled scrubbers are used. The same limitations on the choice of washer material used in wet washers that used sodium-based alkali apply to calcium-based wet washers. The flue gas desulfurization plant with the calcium-based alkali process consists of the following equipment [2, 11]:

- Unfilled washer (with circulation/reaction tank and droplet trap)
- Circulation pumps
- Lime silo and dosing unit
- Gypsum dewatering
- Separation of heavy metals (if necessary)

The structure of the unfilled free-flow washer/scrubber and the circulation pumps is practically the same as the sodium component washer system. The washer size is slightly larger than the sodium component washers, due to the considerably lower reaction rate of the calcium components. The droplet trap system is the same in both processes. The scrubber solution is also kept in the weak acid pH range. Likewise, the administration of calcium components is provided depending on the pH value of the washing solution.

While the sodium components are stored in the system as an aqueous solution, the calcium components are stored dry in silos. The introduction of calcium oxide (lime) into the system is usually accomplished by dosing a pre-prepared suspension. Calcium carbonate (limestone) is fed directly from the storage silo via a screw conveyor to the tank under the washer dry, where it is mixed with water to prepare a solution. If necessary, it is also possible to feed dry in calcium hydroxide and calcium oxide. Circulation pumps and spray nozzles are the same as described in Section 4.1.

The gypsum formed by the absorption of sulfur dioxide in the washing solution is dewatered to 10% humidity in a continuous vacuum band filter. The gypsum obtained in this way is used as a raw material in the construction industry, for example in cement production. The permeate water released from the gypsum dewatering unit is sent back to the process and thus a closed water circulation is provided. The disadvantage of the calcium component process compared to the sodium component is that it has a higher initial investment cost. The initial investment cost of the calcium component desulfurization plant is 60-70% higher due to the required plant/equipment technique, especially the vacuum belt filter and the silo, as well as the slightly larger size of the scrubber. As can be seen from the comparison given below, this high initial investment cost also pays for itself in a short period with considerably lower operating costs. However, if the crystallization unit required for the caustic process is also used, this disadvantage is eliminated.

4. OPERATING COST COMPARISON OF WET FGD SCRUBBERS

To compare the operation costs of wet FGD scrubbers operating with a caustic and limestone process, a 60 MWh electric diesel power plant was investigated. As fuel, approximately 3.5% sulfur heavy fuel (No. 6 Fuel-Oil), which is consumed for this purpose in Türkiye, was used. The operating values and operating expenses unit prices of a diesel power plant with a 60 MWh electric power plant at 8,000 hours annual operation time are given in Table 1 and explained as follows:

- The large diesel engine power plant requires an air intake flow rate in the range of 4-8 Nm³ per kWh [12]. Assuming a wet air intake flow rate of 5.65 Nm³/kWh, the hourly flue gas flow rate will be $\dot{Q}_{flue\ gas,wet} = 340,000\text{ Nm}^3/\text{h}$ for the wet air and $\dot{Q}_{flue\ gas,dry} = 310,000\text{ Nm}^3/\text{h}$ for dry air for a 60 MWh diesel power plant. The flue gas temperature is assumed to be 200°C.
- The SO₂ inlet concentration in flue gas is $C_{SO_2,inlet} = 3,900\text{ mg}/\text{Nm}^3$, dry based on burning a heavy fuel with 3.5% sulfur content. The SO₂ outlet concentration after scrubber in clean gas is set to less than $C_{SO_2,outlet} < 700\text{ mg}/\text{Nm}^3$. The SO₂ emission limit for liquid fuel-burning power plants between 50-100 MWh is 850 mg/Nm³ in Türkiye (see page 5 in [17]). The SO₂ removal efficiency (E_{SO_2}) of the wet scrubber can be calculated by Eq. (7):

$$E_{SO_2} = \left(1 - \frac{C_{SO_2,outlet}}{C_{SO_2,inlet}}\right) 100\% = \left(1 - \frac{700 \frac{mg}{Nm^3}}{3900 \frac{mg}{Nm^3}}\right) 100\% = 82\% \quad (7)$$

- The SO₂ amount captured per hour ($\dot{m}_{SO_2,captured}$) in a 60 MWh power plant can be calculated by Eq. (8-9) as 992 kg/h:

$$\dot{m}_{SO_2,captured} = (C_{SO_2,inlet} - C_{SO_2,outlet}) \dot{Q}_{flue\ gas,dry} \quad (8)$$

$$\dot{m}_{SO_2,captured} = \left(3900 \frac{mg}{Nm^3} - 700 \frac{mg}{Nm^3}\right) 310000 \frac{Nm^3}{h} = 992 \frac{kg}{h} \cong 1000 \frac{kg}{h} \quad (9)$$

- Average the capital installation cost of the limestone FGD process unit was \$108.15 per kWh of a electric power plant (101.66 Euro per kWh with an exchange rate of \$1=0.94 Euro) in the year 2022 [13]. The capital cost of the limestone FGD unit of a 60 MWh power plant, including installation, commissioning, and construction works, is approximately based on 2022 prices to be 6.0 million Euros for the limestone FGD process unit (101.66 Euro/kWh x 60,000 kWh = 6.0 million Euro).
- The capital installation costs of the caustic FGD process unit with a filled packed-tower scrubber are ranged from \$23,000 to \$117,000 per Nm³/sec flue gas flow rate based on U.S. EPA (Environmental Protection Agency) Air Pollution Control Technology Fact Sheet [15] which was based on 2002 US Dollars. Assuming a capital cost of \$26,500 per Nm³/sec flue gas flow rate is appropriate for the Turkish market, the capital cost of a caustic FGD process unit for a flue gas flow rate of 310,000 Nm³/h, dry (86.11 Nm³/sec) will be \$2.28 Million in 2002 prices. Based on

the Consumer Price Index (CPI) inflation calculation [16], \$1 in 2002 is equivalent in purchasing power to about \$1.63 in 2022. So, \$2.28 million in 2002 is equivalent to \$3.72 million in 2022 (equivalent to 3.5 million Euros in 2022 with an exchange rate of \$1=0.94 Euro). So, the capital cost of the caustic FGD unit of a 60 MWh electric power plant, including installation, commissioning, and construction works, is approximately based on 2022 prices to be 3.5 million Euros for the caustic FGD process unit.

Table 2 shows the operating material consumption values for caustic and limestone FGD scrubbers which are explained as follows:

Table 1: Operating values and unit prices of operating expenses of a 60 MWh power plant.

Operating Values	Amount	Unit
Flue gas flow rate	340,000 310,000	Nm ³ /h, wet Nm ³ /h, dry
Flue gas temperature	200	°C
SO ₂ Concentration, flue gas	3,900	mg/Nm ³ , dry (O ₂ =% 12)
SO ₂ Concentration, clean gas	<700	mg/Nm ³ , dry
Amount of captured SO ₂	992 \cong 1,000 ¹	kg/h
Operation time	8,000	h/year
Operating Expenses Unit Prices		
CaCO ₃ – 100%	50	Euro/Ton
NaOH – 100%	500	Euro/Ton
Water	2.36 ²	Euro/m ³
Electric	0.15 ³	Euro/kWh
Blower air	0.075 ⁴	Euro/Nm ³
Gypsum transport	4.5 ⁵	Euro/Ton
NaSO ₄ waste disposal	18.8 ⁶	Euro/Ton

¹ Calculated with Eq. (9).
² 2022 average industrial water price in Türkiye was 35 YTL/m³ x 0.0676 Euro/YTL=2.36 Euro/m³.
³ In 2022 the average industrial electric price in Turkey was 0.2174 YTL/kWh x 0.0676 Euro/YTL=0.15 Euro/kWh [18].
⁴ Compressed air cost was \$0.08 (0.075 Euro) per Nm³ in Türkiye in 2022 [21].
⁵ The cost of gypsum transport by truck was set as \$0.19 per ton-mile (see page C-8 in [22]). For a 40 km (25 mile) transportation distance, the gypsum transport cost in Türkiye will be approximately \$4.75 (4.5 Euro).
⁶ NaSO₄ waste product disposal costs vary from \$10/ton to \$30/ton in 2001 (see page 2 of [23]). The sodium sulfate (NaSO₄) waste is a low hazardous waste and its disposal per ton is assumed to be around \$20 (18.8 Euro) in 2022 (\$12 in 2001) with CPI inflation calculation [16].

Table 2: Consumption of FGD operating materials.

Operating Materials	Unit	NaOH Scrubber	CaCO ₃ Scrubber
	kg/h	1,000	1,000
Captured SO ₂	Ton/year	(1,000 kg/h) x (8,000 h/year) = 8,000 ton/year	(1,000 kg/h) x (8,000 h/year) = 8,000 ton/year
CaCO ₃ consumption	kg/h	-	1,600
	Ton/year	-	12,800
NaOH consumption	kg/h	1,250	-
	Ton/year	10,000	-
Water consumption	m ³ /h	52	25
	m ³ /year	416,000	200,000
Electric consumption	kW/h	340	600
	kWh/year	2.72 million	4.8 million
LSFO blower air	Nm ³ /h	-	3150 ⁷
	Nm ³ /year	-	25.2 million
Produced gypsum	kg/h	-	2,200
	Ton/year	-	17,600
Produced NaSO ₄ waste	kg/h	2,220	-
	Ton/year	17,760	-

- Limestone consumption: 1 kmol (64.066 kg) SO₂ removal requires 1 kmol (100.087 kg) CaCO₃ per Equation 6 which is equal to 1562 kg CaCO₃ is needed to capture 1,000 kg SO₂ per hour. With a chemical reaction efficiency of 97%, approximately 1,600 kg/h CaCO₃ is needed for the required SO₂ removal amount.
- Caustic soda consumption: 1 kmol (64.066 kg) SO₂ removal requires 2 kmol (179.994 kg) NaOH per Equation 3 which is equivalent to 1,248.62 kg (approximately 1,250 kg) NaOH is required to capture 1000 kg SO₂ per hour.
- Water consumption for CaCO₃ scrubber: Typical makeup water consumption for limestone wet scrubbers is 5.7-6.8 L/min (0.342-0.408 m³/h) per MWh (see Section 3.1 in [19]). By assuming

6.8 L/min water consumption, a 60 MWh power plant needs $24.5 \cong 25 \text{ m}^3/\text{h}$ fresh water per hour for its limestone wet scrubber unit.

Table 3: Comparison of wet FGD scrubbers' operating costs.

Operating Expenses	Unit	NaOH Scrubber	CaCO ₃ Scrubber
CaCO ₃ consumption	Ton/year	-	12,800
	Euro/year	-	0.64 million
NaOH consumption	Ton/year	10,000	-
	Euro/year	5 million	-
Water consumption	m ³ /year	416,000	200,000
	Euro/year	0.982 million	0.472 million
Electric consumption	kWh/year	2.72 million	4.8 million
	Euro/year	0.408 million	0.72 million
Compressed air	Nm ³ /h	-	25.2 million
	Euro/year	-	1.89 million
Gypsum transport	Ton/year	-	17,600
	Euro/year	-	0.0792 million
NaSO ₄ waste removal	Ton/year	17,760	-
	Euro/year	0.3339 million	-
Total Cost	Euro/year	6.724 million	3.801 million

- Water consumption for NaOH scrubber: Packed-bed scrubbers have a recommended liquid-to-gas ratio (L/G) in the range of 1.2 to 1.5 gpm (gallon per minute) per 1000 cfm (cubic feet per minute) of waste gas (0.16 to 0.2 L/Nm³) per U.S. EPA Air Economics Group (see page 1-69 in [20]). Assuming an L/G ratio of 0.167 L/Nm³, the NaOH packed-bed scrubber requires approximately 52 m³/h water for washing out 310,000 Nm³ dry flue gas flow per hour.
- Electric consumption for CaCO₃ scrubber: FGD limestone wet scrubber systems have a relatively low auxiliary power consumption of around 1-2% of the power plant [24]. So CaCO₃ scrubber will consume around 600 kWh/h which is around 1% consumption of a 60 MWh electric power plant.

- Electric consumption for NaOH scrubber: Alkaline NaOH scrubber's energy usage lies between 0.2-1.0 kWh per 1000 Nm³/h flue gas flow [25]. By using a conservative value of 1.0 kWh/1000 Nm³/h, the NaOH scrubber will consume 340 kWh for 340,000 Nm³/h wet flue gas flow rate.
- LSFO blower air for CaCO₃ reaction tank: An LSFO blower air amount of 7.9 kg/h is used for a flue gas SO₂ inlet amount of 2.38 kg/h in a U.S. EPA test for sludge oxidation in a limestone FGD scrubber (see page 51 in [26]). The SO₂ inlet amount ($C_{SO_2,inlet} \dot{Q}_{flue\ gas,dry}$) for 60 MWh electric diesel power plant is 1210 kg/h which requires an oxidation blower amount of 4,016 kg/h (3,106 Nm³/h with an air density 1.293 kg/Nm³). A blower size of 3,150 Nm³/h is suitable for this limestone FGD reaction tank.
- Produced gypsum (CaSO₄): 1 kmol (100.087 kg) CaCO₃ can produce 1 kmol (136.14 kg) gypsum per Equation 6. A total of 1,600 kg/h limestone consumption will produce 2,176.35 \cong 2,200 kg/h gypsum.
- Produced NaSO₄ waste: 2 kmol (79.994 kg) NaOH can produce 1 kmol (142.04 kg) NaSO₄ per Equation 3. A total of 1250 kg/h caustic soda consumption will produce 2,219.54 \cong 2,220 kg/h sodium sulphate waste.

Table 3 compares the two types of wet FGD scrubbers in terms of operation costs which were calculated by multiplying the annual consumption values in Table 2 with the unit prices in Table 1.

4. CONCLUSION

As explained in detail before, the flue gas desulfurization process with calcium carbonate as the absorption agent has more fundamental advantages over the caustic (sodium hydroxide) process, due to the final gypsum raw material formation. In addition to the very low operating cost, the process using limestone results in a final product that does not need treatment. In addition, since no wastewater is generated, the very difficult and costly wastewater treatment process is eliminated. Fig. 4 shows a limestone flue gas desulfurization plant.

NaSO₄ waste released in caustic desulfurization causes additional wastewater treatment investment and operating costs. As can be seen from the above comparisons, the operating cost of the washer that uses limestone as a chemical solution is 4.36 million Euros less per year than the caustic washer. As a result, the limestone washer, whose initial investment cost is 2.5 million Euros higher than the caustic washer, pays for itself within 10 months. Thus, the system with caustic and limestone reaches the same level within 10 months in terms of initial investment cost. The most important thing is that 2.923 million Euros will be saved every year.



Figure 4: A limestone flue gas desulfurization plant [5].

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

No conflict of interest or common interest has been declared by the author.

FUNDING

The author has not received any financial support for the research, authorship, or publication of this study.

THE DECLARATION OF ETHICS COMMITTEE APPROVAL

This study does not require ethics committee permission or any special permission.

THE DECLARATION OF RESEARCH AND PUBLICATION ETHICS

The author of the paper declares that he complies with the scientific, ethical, and quotation rules of Kırklareli University Journal of Engineering and Science) (KUJES) in all processes of the paper and that they do not make any falsification on the data collected. In addition, he declares that Kırklareli University Journal of Engineering and Science and its editorial board have no responsibility for any ethical violations that may be encountered and that this study has not been evaluated in any academic publication environment other than Kırklareli University Journal of Engineering and Science.

REFERENCES

- [1] Flagan, R. C., & Seinfeld, J. H., *Fundamentals of Air Pollution Engineering*. 1st ed., Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall Inc., 1988.
- [2] Heinsohn, R. J., & Kabel, R. L., *Sources and Control of Air Pollution*. 1st ed., Prentice-Hall Inc., 1999.
- [3] Heinsohn, R. J., *Control of Gaseous Pollutants – Absorption*. In *Air Pollution Engineering Manual*, 2nd ed., New York, NY, USA, John Wiley & Sons, Inc.: W. T. Davis, 2000, ch. 2, sec. 1, pp. 22-36.
- [4] Meckl, S., & Wunder, R., *Wäßrige Stoffsysteme zur Absorption von SO₂*, *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 93, no. 1, pp. 1-5, 1991.

- [5] Steuler Press Release, “Steuler Anlagenbau Designs Waste Water and Waste-free Flue Gas Treatment Plant for Seagoing Vessels,” 2019. [Online]. Available: <https://www.steuler.de/fileadmin/shared/documents/press-releases/en/2019-12-09-steuler-anlagenbau-designs-flue-gas-treatment-for-seagoing-vessels.pdf>
- [6] Koralegedara, N., Pinto, P. X., Dion-ysiou, D. D., & Al-Abed, S. R., Recent advances in flue gas desulfurization gypsum processes and applications – A review, *Journal of Environmental Management*, vol. 251, article no. 109572, 2019.
- [7] Li, X., Han, J., Liu, Y., Dou, Z., & Zhang, T. A., Summary of research progress on industrial flue gas desulfurization technology, *Separation and Purification Technology*, vol. 281, article no. 119849, 2022.
- [8] “Bekaplast Lining,” Steuler-KCH GmbH. Siershanh, Germany. [Online]. Available: <https://linings.steuler.de/en/products/bekaplast.html>
- [9] Leivo, C. C., *Flue Gas Desulfurization Systems: Design and Operating Considerations, Volume II. Technical Report*, U.S. EPA (Environmental Protection Agency) Report # EPA-600/7-78-030b, March 1978.
- [10] Poullikkas, A., Review of Design, Operating, and Financial Considerations in Flue Gas Desulfurization Systems, *Energy Technology & Policy*, vol. 2, pp. 92013, 2015. DOI: 10.1080/23317000.2015.1064794
- [11] Prada, I. D. C., Rivera-Tinoco, R., and Bouallou, C., Flue Gas Desulfurization Assessment by Modeling and Experimental Work of an Optimized Fixed-Bed NaHCO₃ Reactor, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 58, no. 40, pp. 18717–18730, 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b03010>
- [12] Diesel Power Plant – Components, Operation and Applications. Electrical Technology Organization. [Online]. Available: <https://www.electricaltechnology.org/2021/08/diesel-power-plant.html>
- [13] Average Costs of Existing Flue Gas Desulfurization Units. U.S. Energy Information Administration. [Online]. Available: https://www.eia.gov/electricity/annual/html/epa_09_04.html
- [14] Sharma, A. K., Prasad, D. S. N., Acharya, S., and Sharma, R., Utility and Application of FGD System (Flue Gas Desulphurization) in Chemical and Environmental Engineering, *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, vol. 3, no. 2, pp. 1-7, 2012. [Online]. Available: <http://www.ijcea.org/papers/173-C00009.pdf>
- [15] Air Pollution Control Technology Fact Sheet for Packed-Bed/Packed-Tower Scrubber. U.S. EPA (Environmental Protection Agency) CICA Fact Sheet # EPA-425/F-03-015. [Online]. Available: <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/fpack.pdf>
- [16] CPI (Consumer Price Index) Inflation Calculator. [Online]. Available: <https://www.in2013dollars.com/us/inflation/>
- [17] Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik Taslağı, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. [Online]. Available: https://www.itkib.org.tr/duyurular/sirkuler/dosyalar/SanKayHavKirYDYTsIk_00002006.pdf
- [18] TUIK (Türkiye İstatistik Kurumu). [Online]. Available: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Elektrik-ve-Dogal-Gaz-Fiyatlari-I.-Donem:-Ocak-Haziran-2022-45567#:~:text=T%C3%9C%C4%B0K%20Kurumsal&text=Sanayide%202022%20y%C4%B1%C4%B1%20I.%20d%C3%B6nem,ortalama%20217%2C4%20kuru%C5%9F%20oldu.>
- [19] Carpenter, A. M., *Low Water FGD Technologies*, U.S. Energy Association Report # CCC/210, ISBN 978- 92-9029-530-3, November 2012. [Online]. Available: https://usea.org/sites/default/files/112012_Low%20water%20FGD%20technologies_ccc210.pdf
- [20] Sorrels, J. L., *Wet and Dry Scrubbers for Acid Gas Control*, U.S. EPA Air Economics Group, 2021. [Online]. Available: https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-05/documents/wet_and_dry_scrubbers_section_5_chapter_1_control_cost_manual_7th_edition.pdf
- [21] Compressed Air Cost–Industrial Utilities. Intratec. [Online]. Available: <https://www.intratec.us/products/water-utility-costs/commodity/cost-of-compressed-air#middle-east-africa>
- [22] Beneficial Use Evaluation: Flue Gas Desulfurization Gypsum as an Agricultural Amendment, March 2023. U.S. EPA Report #EPA 530-R-23-004. [Online]. Available: https://acaa-usa.org/wp-content/uploads/2023/04/FGD_Ben_Use_Eval_with_Appendices_March_2023_508.pdf

- [23] Air Pollution Control Technology Fact Sheet for Flue Gas Desulfurization. U.S. EPA CICA Fact Sheet # EPA-425/F-03-034. [Online]. Available: <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/ffdg.pdf>
- [24] Forbes, A., Cleaning up with FGD Technology: Making Profitable Trade-offs in Desulfurizing Power, January 12, 2018. [Online]. Available: <https://www.ge.com/power/transform/article.transform.articles.2018.jan.cleaning-up-with-fgd-technolog#:~:text=Wet%20scrubber%20systems%20can%20be,on%20the%20coal's%20sulfur%20content>.
- [25] Alkaline Scrubber, Emis. [Online]. Available: <https://emis.vito.be/nl/node/19467#ftn1>
- [26] Borgwardt, R. H., Sludge Oxidation in Limestone FGD Scrubbers, U.S. EPA Report # EPA-600/7-77-061, 1977. [Online]. Available: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=9101CY00.txt>
- [27] Islam, M. S., Saha, S. C., Gemci, T., Yang, I. A., Sauret, E., Ristovski, Z., and Gu, Y. T., Euler-Lagrange Prediction of Diesel-Exhaust Polydisperse Particle Transport and Deposition in Lung: Anatomy and Turbulence Effects, *Scientific Reports*, vol. 9, Article no. 12423, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48753-6>
- [28] Islam, M.S., Saha, S.C., Gemci, T., Yang, I.A., Sauret, E., and Gu, Y.T., Polydisperse Microparticle Transport and Deposition to the Terminal Bronchioles in a Heterogenous Vasculature Tree, *Scientific Reports*, vol. 8, Article no. 16387, 2018. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-34804-x>
- [29] Islam, M.S., Saha, S.C., Sauret, E., Gemci, T., Yang, I.A., and Gu, Y.T., Ultrafine Particle Transport and Deposition in a Large Scale 17-Generation Lung Model, *Journal of Biomechanics*, vol. 64, pp 16-25, 2017.
- [30] Bratveit, M., Haaland, I. M., Moen, B., and Malsnes, A., Exposure to sulfuric acid in zinc production. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 48, pp. 159–170, 2004.
- [31] Shangina O., Brennan, P., Szeszenia-dabrowska, N., Mates, D., Fabia’Nova, E., Fletcher, T., Mannetje, A. T., Boffetta, P., and Zaridze, D., Occupational exposure and laryngeal and hypo-pharyngeal cancer risk in central and eastern Europe. *American Journal of Epidemiology*, vol. 164, pp. 367–375, 2006.
- [32] Hsu, Y.-M., Wu, C.-Y., Lundgren, D., and Birky, B. K., Size-resolved sulfuric acid mist concentrations at phosphate fertilizer manufacturing facilities in Florida. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 51, pp. 81–89, 2007.
- [33] Srivastava, R. K. and Jozewicz, W., Flue Gas Desulfurization: The state of the art, *Journal of Air & Waste Management Association*, vol. 51, pp. 1676-1688, 2002.

Comparison of Different Methods for Optimization of PID Controller Gain Coefficients

Gülten YILMAZ^{1*} 

Electronic Automation Department, Hereke Asım Kocabıyık Vocational College, Kocaeli University, Kocaeli, Turkey

Geliş: 06.06.2023, Kabul: 28.09.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

ABSTRACT

Proportional-Integral-Derivative (PID) controller is widely used in technical applications due to its robustness and ease of application. The gain values of a PID controller have a strong impact on performance criteria such as settling time, rise time, and overshoot. Systems that possess at least one of these criteria are considered strong control systems. Adjusting the parameters to obtain the best step response of closed loop control systems is a complex operation. While long known methods such as the Ziegler-Nichols (ZN) method were initially used to compute parameter values, today, metaheuristic algorithms are employed. This article focuses on the tuning of gain parameters of a PID controller using metaheuristic algorithms for the control of a system with a third-order transfer function. The proposed algorithms are Fuzzy Logic (FL), Genetic Algorithm (GA), and Particle Swarm Optimization (PSO). The comparison results concluded that GA is the best algorithm for optimization.

Keywords: PID; PSO; GA; Fuzzy Logic (FL); Metaheuristic

PID Kontrolörün Kazanç Katsayılarının Optimizasyonu için Farklı Yöntemlerin Karşılaştırılması

ÖZ

Orantılı-İntegral-Türev (PID) denetleyici, sağlamlığı ve uygulama kolaylığı nedeniyle teknik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir PID denetleyicinin kazanç değerleri, oturma zamanı, yükselme zamanı ve aşma gibi performans kriterleri üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Bu kriterlerin en az değerine sahip sistemler, güçlü kontrol sistemleri olarak kabul edilir. Kapalı döngü kontrol sistemlerinin, en iyi basamak tepkisini elde etmek için parametrelerin ayarlanması karmaşık bir işlemdir. Parametre değerlerini hesaplamak için başlangıçta Ziegler-Nichols (ZN) yöntemi gibi uzun zamandır bilinen yöntemler kullanılırken, günümüzde metasezgisel algoritmalar kullanılmaktadır. Bu makale, üçüncü dereceden transfer fonksiyonuna sahip bir sistemin kontrolü için metasezgisel algoritmalar kullanan bir PID kontrol cihazının kazanç parametrelerinin ayarlanmasına odaklanmaktadır. Önerilen algoritmalar, Bulanık Mantık (FL), Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonudur (PSO). Karşılaştırma sonuçları GA'nın optimizasyon için en iyi algoritma olduğu sonucuna varmıştır.

Anahtar Kelimeler: PID; PSO; GA; Bulanık Mantık (BM); Metasezgisel

1. INTRODUCTION

PID controllers are widely used in technical applications due to its robustness and ease of applications [1]. The utilization of the PID algorithm does not guarantee the best control and even stability of the system if the gain values are not adequately tuned. Its proper functioning is not guaranteed; it can be significantly affected by dead times (the measured error may not arrive instantly or the control action may not be applied right away). The response of a control system can be defined in terms of the error, the degree to which the system exceeds a set point, and the amount of oscillation around any set value. However, a PID controller, relying solely on the measurable system variable rather than the underlying process information, is widely applicable and has a long history of successful use in a in many applications [2-6]. A PID controller has three gain coefficients to meet some system performance criteria. These are the proportional gain coefficient K_p , integral gain coefficient K_i , and derivative gain coefficient K_d . In some applications, only one or two of these parameters are used to achieve appropriate system control (PI, P, or PD). However, the absence of one of the control effects leads to errors in achieving the system's objective. Especially in nonlinear control systems, finding the optimal parameter values for the PID controller is a challenging task [7]. One commonly used method for parameter tuning is the Ziegler-Nichols (Z-N) method [8]. In many industrial systems, the Z-N method is not acceptable as it fails to sufficiently improve performance criteria such as overshoot, settling time, and rise time. The solution is to use metaheuristic solutions to optimize the step response of closed-loop control systems.

Optimizing the step response of control systems aims to minimize overshoot or reduce settling time and rise time. Metaheuristic algorithms are stochastic strategies that mimic the behavior of social and ecological systems, commonly used to optimize problems of applied sciences. These algorithms can be utilized to select the best combination of PID controller gain coefficients that yield the optimal transient response. In this study, Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, Genetic Algorithm (GA), and Fuzzy Logic (FL) rule-based PID controller parameter tuning methods were employed, and the results obtained were compared with each other.

The subsequent sections of the article are planned as follows: The method of the study is explained in Chapter 2. Section 3 provides information about the simulations conducted after the description of optimization algorithms. In Section 4, the results are presented.

2. MATERIAL AND METHODS

We can define the control problem as shown in Figure 1. The gain coefficients (K_p , K_i , K_d) of the PID controller are desired to be optimized for the best control performance. The output of the PID controller is calculated based on the time-varying error as shown in Equation 1.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

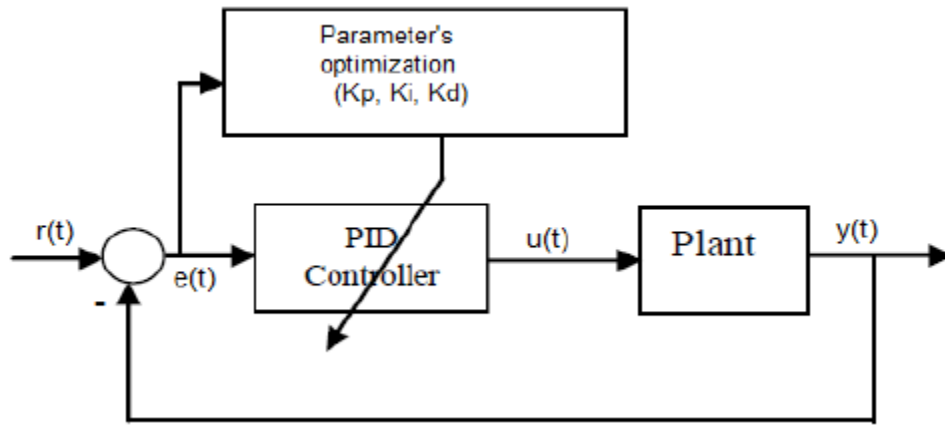


Figure 1: Structure of PID controller parameter optimization.

Performance indices are used as quantitative measures to evaluate the system performance of a PID controller. This technique is commonly used to design an "optimal system" and adjust a set of PID parameters to meet the required specifications. For a system controlled by PID, there are typically four performance indices that indicate the system performance: ISE, IAE, ITAE, and ITSE. They are defined as follows:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (2)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (3)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (4)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \quad (5)$$

Here, t represents time, and $e(t)$ is the difference between the setpoint and the controlled variable. ISE is used in this article to define the performance for different parameters.

The transfer function of the system to be controlled is a third-order system as given in Eq.6

$$G(s) = \frac{s+2}{s^3+2s^2+3s+5} \tag{6}$$

3. OPTIMIZATION METHODS

3.1 Optimization with Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm (PSO-PID)

PSO is an optimization algorithm based on evolutionary computation techniques. The basic PSO algorithm was developed from swarm research such as fish schools and bird swarms [9]. After its initial introduction in 1995 [10], the original PSO was modified in 1998 to improve its performance.

The PSO algorithm is initialized with random particles and then iteratively updates generations to search for the optimal solution. Each particle represents the proportional, integral, and derivative gains of the PID controller. In each iteration, each particle is updated with two important values: pbest and gbest. pbest represents the best-known position of the particle, while gbest represents the best-known position of the swarm. Each particle updates its positions (x) and velocities (v) based on the following equations 7 and 8 according to the best two values:

$$v_{t+1} = wv_1 + c_1r_1(p_t - x_t) + c_2r_2(G_t - x_t) \tag{7}$$

$$x_{t+1} = x_t + v_{t+1} \tag{8}$$

The model created in Matlab/Simulink for the simulations of the optimization of PID controller gain coefficients using the PSO algorithm is shown in Figure 2.

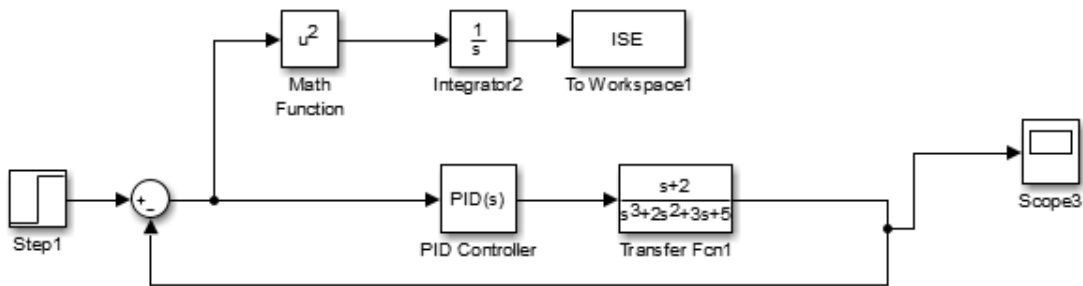


Figure 2: Control system Simulink model for PSO optimization

The parameters for the PSO algorithm were selected as shown in Table 1. The variation of the fitness index with respect to iterations can be seen in Figure 3. The best fitness index value was calculated as $ISE = 2.2247$.

Table 1: PSO parameters

Parameters	Value
Max. iteration	50
Swarm population	60
$c_1 = c_2$	2
W_{max}	0.9
W_{min}	0.4
Fitness index	ISE

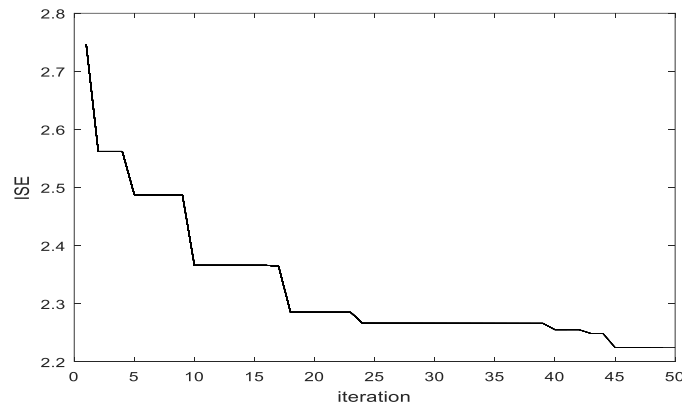


Figure 3: The best fitness values

Based on the fitness value in Figure 3, the PID controller gain parameters are determined as follows: $K_p = 23.866$, $K_i = 32.034$, and $K_d = 8.590$.

3.2 Optimization with Genetic Algorithm (GA) (GA-PID)

Genetic Algorithm (GA) is a metaheuristic approach inspired by the natural selection process and belongs to the class of evolutionary algorithms (EA). Genetic algorithms can generate high-quality solutions inspired by biological processes such as mutation, crossover, and selection. Therefore, it is used in many optimization and search problems [11-14].

Genetic Algorithm is an optimization method inspired by natural selection and genetics. The algorithm starts with a randomly initialized population of potential solutions in the search space. Individuals are represented by design variables or their encoded form (chromosome). Some solutions from the initial population are used to generate a new population using genetic operators

(crossover, mutation, etc.). This is motivated by the hope that the new population will be better than the previous one. Solutions to be used for creating new solutions are randomly selected based on their values (represented by an objective function specific to the problem at hand, to be minimized or maximized): the better the individual, the higher its chances of survival and reproduction until a convergence criterion is met (typically a fixed number of generations or a target value reached by the objective function). Some advantages of genetic algorithms are listed below [15]:

- Global search capability: Genetic algorithms can explore a wide range of solutions and are not easily trapped in local optima.
- Robustness: Genetic algorithms can handle complex, non-linear, and multimodal optimization problems.
- Population-based approach: By maintaining a population of solutions, genetic algorithms provide diversity and allow for better exploration of the search space.
- Adaptability: Genetic algorithms can adapt to changing environments or problem conditions by updating the population through selection and evolution.
- Parallelization: Genetic algorithms can be parallelized, allowing for faster computation by evaluating multiple solutions simultaneously.

The most important step in the application of a genetic algorithm is the selection of objective functions used to evaluate the fitness of each chromosome. Typically, there are four performance indices used as objective functions (Equations 2-5). Here, the Integral of Squared Error (ISE) is used as the performance index to minimize the error signal. Figure 4 summarizes the computation steps of the control law.

Below, the genetic algorithm is characterized with a total of 50 generations. The population crossover rate is 0.8, the population mutation rate is 0.08, and the number of individuals per population is equal to 30.

First, the optimization interface is opened in Matlab by typing "optimtool". Then, GA optimization is selected, and the parameter settings are determined as shown in Table 2. Finally, the GA optimization is started by clicking "Start". After optimizing fifty times, the obtained values for K_p , K_i , and K_d are 49.70, 49.93, and 49.99, respectively.

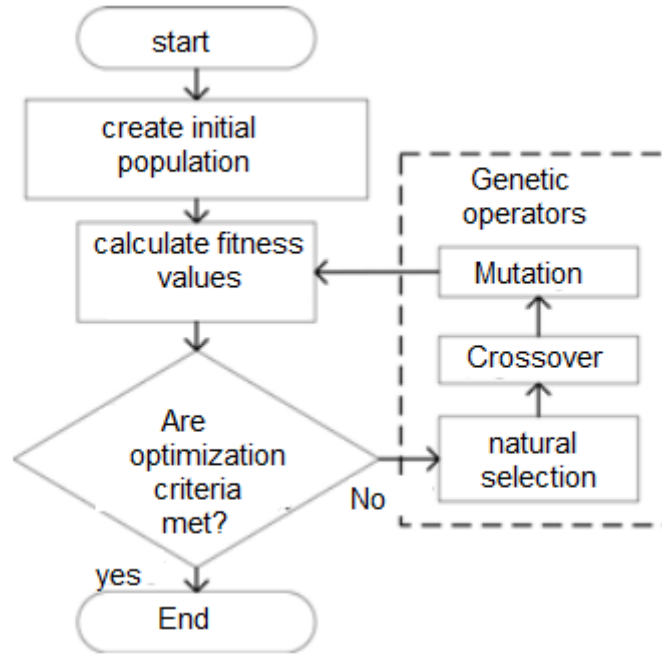


Figure 4: General structure of genetic algorithm

Table 2. GA Optimization Parameters

Parameters	Value
Max. iteration	50
Population type	30
Creation function	Uniform
Scaling function	Rank
Selection function	Tournament
Mutation function	Adaptive feasible
Crossover function	Aritmetic
Plot function	Best fitness
Level of display	Iterative

The obtained optimal performance criterion value through iterations is determined as ISE = 0.01547.

3.3 Optimization With Fuzzy Logic (FL-PID)

In this section, Fuzzy Logic Controller (FLC) will be used for the optimization of PID gains. The use of FLC brings adaptability to the controller and enhances its robustness. The Self-Tuning Fuzzy PID (STFPID) controller can be formulated as follows:

$$\begin{aligned}
 f'(t) &= [K_p(t)e(t)] + \int_0^t [K_i(\tau)e(\tau)]d(\tau) + \frac{d[K_d(t)e(t)]}{dt} \\
 &= [k_p^0 + \Delta k_p(t)]e(t) + \int_0^t [k_i^0 + \Delta k_i(\tau)]e(\tau)d(\tau) + \frac{d[k_d^0 + \Delta k_d(t)]e(t)}{dt}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Here, $K_p(t) = k_p^0 + \Delta k_p(t)$; $K_i(t) = k_i^0 + \Delta k_i(t)$; $K_d(t) = k_d^0 + \Delta k_d(t)$; are the control gains with some permissible variations.

k_p^0, k_i^0, k_d^0 : They are the time-invariant constant gain values of the PID controller. $\Delta k_p(t), \Delta k_i(t), \Delta k_d(t)$ are the time-varying controller gains during the simulation period.

An Adaptive Fuzzy Logic Controller (FLC) is proposed here to generate $\Delta k_p(t), \Delta k_i(t), \Delta k_d(t)$. FLC utilizes fuzzy linguistic variables NB (Negative Big), NM (Negative Medium), NS (Negative Small), Z (Zero), PS (Positive Small), PM (Positive Medium), and PB (Positive Big) to represent them. FLC has two inputs: the system error $e(t)$ and the derivative of the error with respect to time. To generate the controller gains, FLC requires three outputs. Thus, as shown in Figure 5, FLC has two inputs and three outputs. The triangular (and zmf) membership functions for the inputs and outputs are shown in Figure 6. The range of the input membership functions is (-3 3), and the range of the outputs is (-0.3 0.3) for K_p , (-0.06 0.06) for K_i , and (-0.03 0.03) for K_d .

In cases where the error is large, a larger value of K_p should be chosen to achieve a faster response. A smaller value of K_d can help avoid large instantaneous errors. A small value of K_i will assist in preventing overshoot.

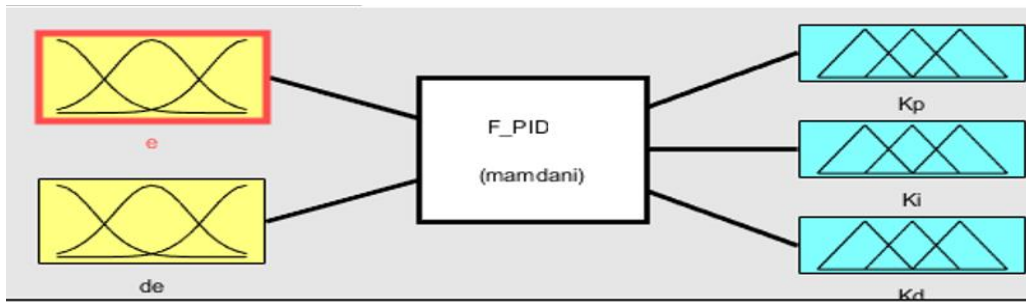


Figure 5: Fuzzy Logic model for tuning PID parameters (Matlab)

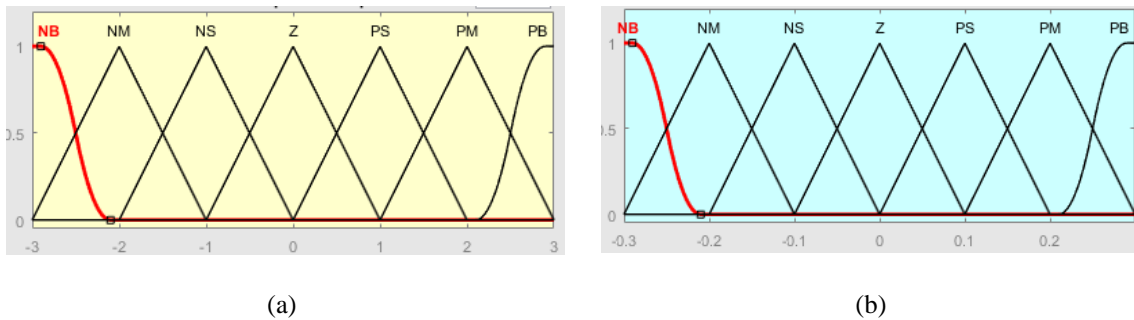


Figure 6: a) Input membership functions (e, de) b) Output membership function (for K_p)

When the error is moderate, reducing K_p gain will help achieve a fast system response and minimize overshoot. A large K_d value will increase the speed of the system response, while K_i gain should be appropriate to reduce steady-state error. When the error is small, large values of K_p and K_i should be used to ensure the system has ideal static performance. Taking these considerations into account, fuzzy rules have been designed for K_p , K_i , and K_d as presented in Tables 3, 4, and 5 respectively.

Table 3: FLC Rule Base for calculate $\Delta K_p(t)$

$\begin{matrix} e \\ \text{de} \end{matrix}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	PS	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB	NB

Table 4: FLC Rule Base for calculate $\Delta K_i(t)$

$\begin{matrix} e \\ \text{de} \end{matrix}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z
NM	NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z
NS	NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS
Z	Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM
PS	PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM
PM	PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB
PB	PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB

Table 5: FLC Rule Base for calculate $\Delta K_d(t)$

$\begin{matrix} e \\ \text{de} \end{matrix}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM
NM	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS
NS	NS	Z	NS	NM	NM	NS	NS
Z	Z	Z	NS	NS	NS	NS	NS
PS	PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PM	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS
PB	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS

The block structure of the STFPID (Self-Tuning Fuzzy PID) created in Matlab/Simulink is shown in Figure 7.

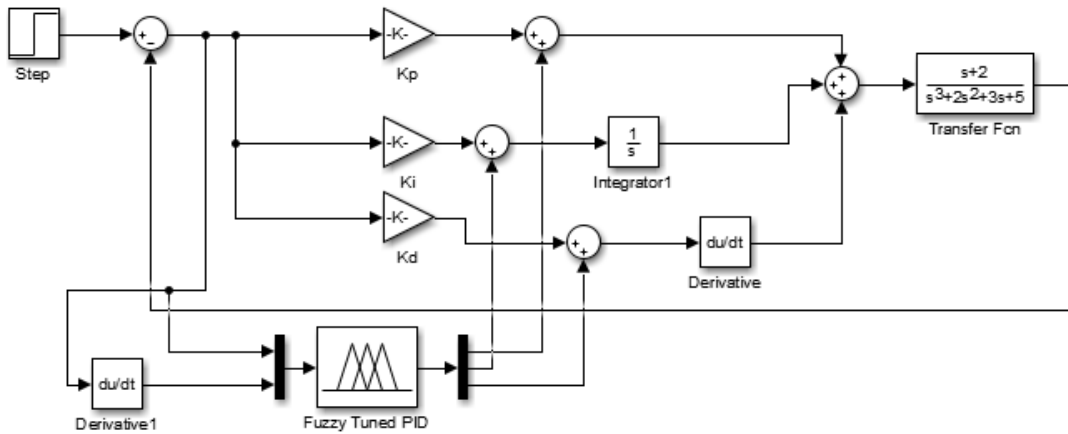


Figure 7: STFPID Matlab/Simulink Model

4. RESULTS

The simulation results of the examined three optimization algorithms for the controlled system's step response are shown in Figure 8. In terms of performance criteria such as rise time, overshoot, and settling time, the best control performance is achieved by the PID controller with gain parameters tuned by Genetic Algorithm (GA-PID). The second best controller in terms of performance achievements is the PID controller with gain parameters tuned by Particle Swarm Optimization algorithm (PSO-PID). The PID controller with gain parameters tuned by Fuzzy Logic rule base (FL-PID), as shown in Table 6, ranks third in performance evaluation. In future studies, simulations can be repeated with different performance indices (ITAE, IAE, ITSE) to further investigate the results.

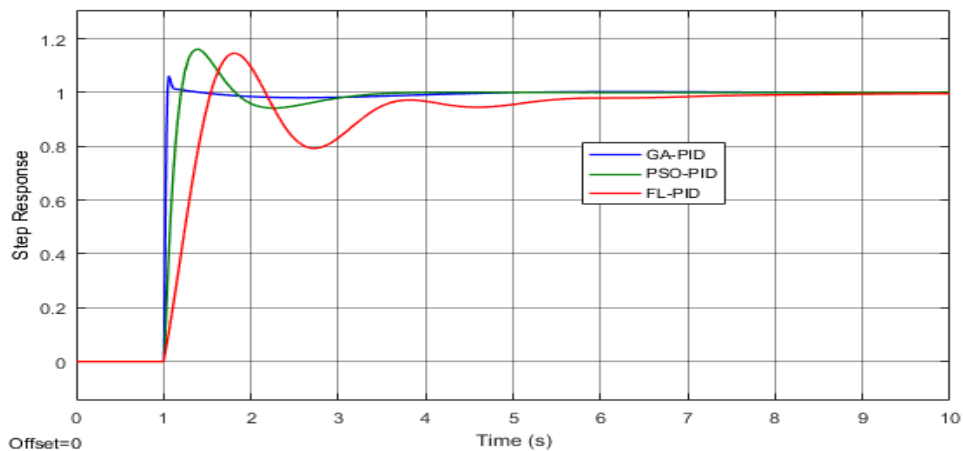


Figure 8: Step response of the system with proposed methods

Table 6: Obtained parameters

Optimization Algorithm	Kp	Ki	Kd	Overshoot (%)	Rise time (ms)	Setling time (s)	ISE
GA-PID	49.70	49.93	49.99	5.851	30.573	3.423	0.015
PSO-PID	23.86	32.03	8.59	15.698	143.364	4.295	2.224
FL-PID	0.98	0.45	1.25	18.452	463.972	8.195	18.245

REFERENCES

- [1] Issa, M., Elbaset, A. A., Hassanien, A. E. and Ziedan, I., PID Controller Tuning Parameters Using Meta-heuristics Algorithms: Comparative Analysis, in *Machine Learning Paradigms: Theory and Application, Studies in Computational Intelligence*, vol. 801. Cham: Springer International Publishing, (2019), pp. 413–430. doi: 10.1007/978-3-030-02357-7_20.
- [2] Hamid, H.A., Md Mahanijah, K., Faieza, H.Y., Application of PID controller in controlling refrigerator temperature, In: *5th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications CSPA 2009*. IEEE (2009)
- [3] Bai, Y., Chen, R., Zhao, Y. and Wang, Y., Gaussian mixture model based adaptive control for uncertain nonlinear systems with complex state constraints, *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 35, no. 5, pp. 361–373, (2022), doi: 10.1016/j.cja.2021.06.017.
- [4] Li, Y. and Ma, D., Robust PID Control of Second-Order Uncertain Nonlinear System with Time-Varying Delay: An Input-Output Approach, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 18, pp. 70–75, (2021), doi: 10.1016/j.ifacol.2021.11.118.
- [5] Ma, D., Boussaada, I., Chen, J., Bonnet, C., Niculescu, S.I. and Chen, J., PID control design for first-order delay systems via MID pole placement: Performance vs. robustness, *Automatica*, vol. 137, p. 110102, (2022), doi: 10.1016/j.automatica.2021.110102.
- [6] Sam, S.M. and Angel, T.S., Performance optimization of PID controllers using fuzzy logic, in *IEEE International Conference on Smart Technologies and Management for Computing*, (2017) Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM), Chennai, India: IEEE, Aug. 2017, pp. 438–442. doi: 10.1109/ICSTM.2017.8089200.
- [7] Zhang, J. and Guo, L., PID Control of Nonlinear Stochastic Systems with Structural Uncertainties, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 2189–2194, (2020), doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.002.
- [8] Ziegler, J.G., Nichols, N.B., Optimum settings for automatic controllers, *Trans. ASME* 64 (11) (1942)
- [9] Ou, C. and Lin, W., Comparison Between PSO and GA For Parameters Optimization of PID Controller, *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics And Automation*, Louyang, China, (2006).
- [10] Shi, Y.H. and Eberhart, R.C., A modified particle swarm optimizer. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Anchorage, Alaska. (1998).
- [11] Sridhar, R., et al., Optimization of heterogeneous bin packing using adaptive genetic algorithm., In: *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, vol. 183. no. 1. IOP Publishing (2017)
- [12] Lai, C., et al., Genetic algorithm based current optimization for torque ripple reduction of interior PMSMs., *IEEE Trans. Ind. Appl.* (2017)
- [13] Saljoughi, E., Application of genetic programming as a powerful tool for modeling of cellulose acetate membrane preparation., *Chem. Ind.* 1, 4 (2017)
- [14] Barley, M.H., Turner, N.J., Goodacre, R., Recommendations on the implementation of genetic algorithms for the directed evolution of enzymes for industrial purposes., *ChemBioChem* (2017)
- [15] Ben, J. A., Coopération méta heuristique et logique floue pour le dimensionnement d'une installation hybride., Thèse pour obtenir le grade de docteur, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, France (2015)

Simulation of Kinematic and Dynamic Model of Two Degrees of Freedom Robot Arm Using Simulink

Aytuğ Becenen^{1*} , Gürkan Tuna² 

¹ Trakya University, Institute of Natural and Applied Sciences, Edirne, Türkiye

² Trakya University, Edirne Vocational College of Technical Sciences, Edirne, Türkiye

Received: 17.06.2023, Accepted: 20.12.2023, Published: 31.12.2023

ABSTRACT

The aim of this study is to realize the physical model of a robot arm with two degrees of freedom in the MATLAB Simulink environment, to show that the physical model of the robot arm matches the mathematical model and that the results of these models match. For this purpose, kinematic and dynamic modeling of a two-degree-of-freedom robotic arm is performed in the MATLAB Simulink environment. To ensure the accuracy of the physical model created in the MATLAB Simulink environment, mathematical equations are defined to a function within the physical model, in other words, a mathematical model is created. The kinematic equations of the robotic arm are examined in two steps as forward kinematics and inverse kinematics equations, and the geometric approach is used when obtaining the kinematic equations. The Lagrange-Euler method is used to obtain dynamic equations. The results obtained show that the mathematical kinematic and dynamic equations match the physical model in the MATLAB Simulink environment and reveal that the system is reliable.

Keywords: Forward kinematics; Inverse kinematics; Lagrange-Euler method; Robot arm

İki Serbestlik Dereceli Robot Kolunun Kinematik ve Dinamik Modelinin Simulink Kullanılarak Benzetimi

ÖZ

Bu çalışmada amaç iki serbestlik derecesine sahip bir robot kolun fiziksel modelinin MATLAB Simulink ortamında gerçekleştirilmesinin yapılması, robot kolun fiziksel modeli ile matematiksel modelinin uyumunu ve bu modellerin sonuçlarının eşleştiğini ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda, MATLAB Simulink ortamında iki serbestlik dereceli bir robot kolun kinematik ve dinamik modellemesi yapılmaktadır. MATLAB Simulink ortamında oluşturulan fiziksel modelin doğruluğundan emin olmak için fiziksel modelin içinde bir fonksiyona matematiksel denklemler tanımlanmaktadır, diğer bir ifadeyle matematiksel bir model oluşturulmaktadır. Robot kolun kinematik denklemleri ileri kinematik ve ters kinematik denklemleri olarak iki adımda incelenmekte olup, kinematik denklemler elde edilirken geometrik yaklaşımdan faydalanılmaktadır. Dinamik denklemler elde edilirken ise Lagrange-Euler metodu kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, matematiksel kinematik ve dinamik denklemlerin MATLAB Simulink ortamındaki fiziksel model ile eşleştiğini göstermekte ve sistemin güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: İleri kinematik; Ters kinematik; Lagrange-Euler metodu; Robot kol

1. INTRODUCTION

Modelling with simulation enables problems to be prevented before they occur in real life to be solved more easily and costless. To put it more clearly, system is necessary to ensure that it works correctly and reliably before a it is implemented, in this way saving time and costs. In this study, it is aimed to demonstrate that the physical model of the robot arm system matches the mathematical model and the accuracy of the physical model to be used before proceeding with the controller design. Therefore, in this study, the compatibility of the physical model and the mathematical model of the two degrees of freedom robot arm is compared in MATLAB Simulink environment and it is ensured that the mathematical and physical model outputs of the designed robot arm system match. Firstly, a robot arm with two degrees of freedom was designed in Solidworks solid drawing program. This robot arm designed in Solidworks solid drawing program was transferred to MATLAB Simulink environment. In this way, the basic block diagram schematic required for the creation of the physical model of the system was obtained. Then, mathematical calculations of the forward kinematic equations and inverse kinematic equations of the system were performed. After kinematic calculations, dynamic equation mathematical calculations of the robot arm system were performed. Mathematical calculations of kinematic and dynamic models are explicated under the heading of materials and methods. Kinematic and dynamic calculations were coded into function blocks in MATLAB Simulink environment and thus mathematical models of the system were created. The creation of the physical model was obtained by creating the kinematic and dynamic models with block diagrams on the basic block diagram scheme obtained by transferring the robot arm system from Solidworks environment to MATLAB Simulink environment. Physical and mathematical model outputs are described in the findings and discussion section. The results of the study are evaluated in the last section.

2. LITERATURE REVIEW

Robot arm systems are systems that operate in many fields today. There are many types of robotic arms for different areas and different needs. Robot arms can be generally analyzed under three headings: industrial robots, mobile robots and robots with haptic systems (Yıldırım, 2021). However, robot arms can be classified in many ways according to their joint structures, usage areas, features, controller type and methods used in their systems or working principles (Gürgüze & Türkoğlu, 2019). Therefore, robotic arms have been widely investigated in the literature. There are many academic studies on topics such as robot arm kinematics, robot arm dynamics, controller design for robot arm systems, and the use of artificial intelligence algorithms with controllers. And what these studies have in common is the frequent use of modeling and simulation techniques.

In (Sahay, Chattopadhyay, & Chowdhury, 2020), a solution for the dynamic equations of a robot manipulator with two degrees of freedom was presented. The solution gives graphs showing how different torque values applied to the joints of the robot arm affect the angular position and angular velocity of each joint.

In (Kebria, Al-wais, Abdi, & Nahavandi, 2016), a different mathematical model for the kinematics and dynamics of one of the robot arm models, UR5, was presented. The study was developed in MATLAB Simulink environment and the SimMechanics model of the robot was created. According to the authors of this research, this model is the most accurate kinematic and dynamic model for this robot to this day.

In (Ghaleb & Aly, 2018), modeling, simulation and control of a robot arm with two degrees of freedom were studied. Forward kinematics, inverse kinematics and dynamic equations are investigated and then a control design using a PID controller is carried out. The modeling is based on MATLAB Simulink.

In (Okubanjo, Oyetola, Osifeko, Olaluwoye, & Alao, 2017), mathematical modeling, control and simulation of a two degrees of freedom robot arm were presented. The robot arm was simulated using MATLAB Simulink and then controlled with a PID controller to reach and maintain a desired joint angle position.

In (Mahto, Kaur, & Jain, 2022), MATLAB Simulink software was used to simulate a robotic arm created in Solidworks environment. Tests of this robotic arm were performed for different input variables and changes in outputs were observed.

In (Zhang, Ma, & Zhang, 2022), the XB7 robotic arm was modelled in MATLAB Simulink environment and dynamic tests were performed. In this study, Newton Euler equation was used for inverse dynamic modeling method and simulation analysis of robotic arm dynamics was performed in Simulink environment.

In (Vivekanandan, Vishnu, Narayanasamy, & Yasodharan, 2019), mathematical modeling and kinematic analysis were performed for the VI5SNS robot arm model. The mathematical modeling of the robot arm was done with the help of the Denavit Hartenberg (D-H) approach. The kinematic equations were generated with the help of Jacobian matrix. Direction planning responses are generated and tested by means of a simulation program.

In (Aydm, 2022), a solid model of the slider-crank mechanism was made in Solidworks and then simulated with MATLAB/Simmechanics. The slider-crank mechanism has a single degree of freedom and its position control was realized with the help of a PID controller and the results were presented.

In (Aydın, 2022), real-time control of a three-degree-of-freedom RRR-type robot arm was realized. The robot arm was designed using Solidworks and modelled in the MATLAB Simulink environment. As input to the robot arm, the coordinates that the end point of the robot arm desired to reach were given and the angle values required for these coordinate values were calculated.

In (Aydın, 2022), the speed control of a slider crank mechanism with one degree of freedom was performed. The system using PID controller was simulated in the MATLAB Simulink environment and the results were presented.

3. MATERIAL AND METHOD

In this section, it is explained how the kinematic and dynamic equations of the robot arm with two degrees of freedom are constructed. The schematic representation of the robot arm is given in Figure 1 and the physical parameters of the robot arm system are given in Table 1.

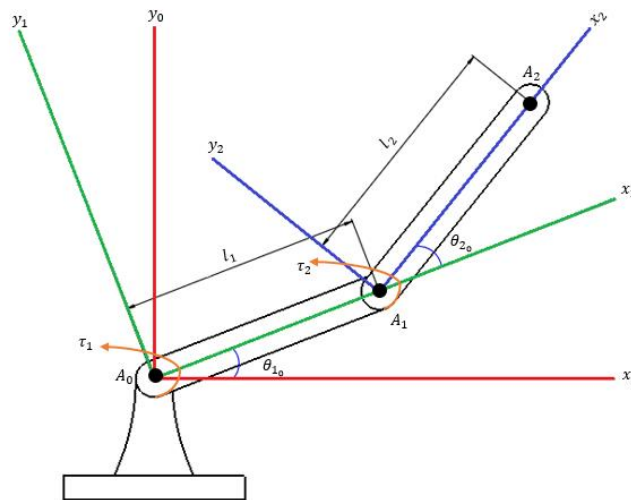


Figure 1: Two degrees of freedom robot arm.

Table 1: Physical Characteristics of the System

Parameters	Symbols	Magnitude	Unit
Length of the link 1	l_1	0.2	Meter
Length of the link 2	l_2	0.2	Meter
Weight of link 1	m_1	0.10060	Kg
Weight of link 2	m_2	0.10139	Kg
Moment of inertia of link 1	I_1	$427.226 \cdot 10^{-6}$	Kgm^2
Moment of inertia of link 2	I_2	$435.274 \cdot 10^{-6}$	Kgm^2

3.1. Robot Arm Kinematics

Robot arm kinematics refers to the relationship between the angles of the robot arm joints and the end point of the robot arm (Barakat, Gouda, & Bozed, 2016), (Küçük & Birgül, 2006). Calculating the endpoint of the robot arm by knowing the angle applied to the joints is called forward kinematics, and calculating the angle to be applied for this coordinate by knowing the position of the robot endpoint is called inverse kinematics. There is more than one way to calculate the kinematic equations (Küçük & Bingül, 2004). In this study, geometric method is preferred to calculate the kinematic equations. The forward kinematics equations that allow finding the coordinates of the robot's endpoint in a system with two degrees of freedom are given in equations (1) and (2).

$$x = l_1 * \cos \theta_1 + l_2 * \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

$$y = l_1 * \sin \theta_1 + l_2 * \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

The inverse kinematic equations derived from the forward kinematic equations are given in equations (3) and (5).

$$\theta_1 = \text{atan2} \left(K/p, \sqrt{1 - \left(\frac{K}{p}\right)^2} \right) \pm \text{atan2}(x, y) \quad (3)$$

$$\frac{x^2 + y^2 + (l_1)^2 - (l_2)^2}{2l_1} = K, K = p * \sin((\theta_2 + \theta_1) + \theta_1) \quad (4)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(y - l_1 * \sin \theta_1, x - l_1 * \cos \theta_1) - \theta_1 \quad (5)$$

The derivatives of the forward kinematic and inverse kinematic position equations give the velocity equations. Forward kinematic velocity equations enable the linear velocity of the robot arm endpoint to be found, and inverse kinematic velocity equations allow the angular velocity applied to the joints to be found. In this study, Jacobian matrix was used to find the kinematic velocity equations. The forward kinematic velocity equations of the robot arm with two degrees of freedom are given in equation (6) and the inverse kinematic velocity equations are given in equation (7).

$$V = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 * \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_2 + \theta_1) & -l_2 * \sin(\theta_2 + \theta_1) \\ l_1 * \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_2 + \theta_1) & l_2 * \cos(\theta_2 + \theta_1) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 * \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_2 + \theta_1) & -l_2 * \sin(\theta_2 + \theta_1) \\ l_1 * \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_2 + \theta_1) & l_2 * \cos(\theta_2 + \theta_1) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

3.2. Robot Arm Dynamics

Robot arm dynamics refers to the equations of motion of the robot arm. Thanks to the equations of motion, it can be calculated how the position, velocity and acceleration of the robot arm change with the force or torque applied to the joints (Hüseyinoğlu & Abut, 2018).

In this study, the Lagrange Euler (L-E) equation was used to establish the equations of motion. The L-E equation is a method of generating the equations of motion from a scalar function obtained by subtracting the potential energies from the kinetic energy of a mechanical system (Craig, 2014). The L-E equation is obtained by taking the difference between the total kinetic energy and the total potential energy of the system. The total kinetic energy of the system is obtained by calculating and summing the individual kinetic energies of all links and the total potential energy of the system is obtained by calculating and summing the individual potential energies of all links. The L-E equation for the robot arm system with two degrees of freedom is given in equations (8-10).

$$L = \sum T - \sum U \quad (8)$$

$$\sum T = \frac{1}{2}[m_1 l_{g_1}^2 + I_1 + m_2 l_1^2] \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}[m_2 l_{g_2}^2 + I_2] \dot{\phi}^2 + m_2 l_1 l_{g_2} \dot{\theta}_1 \dot{\phi} \cos(\phi - \theta_1) \quad (9)$$

$$\sum U = [m_1 g l_{g_1} + m_2 g l_1] \sin \theta_1 + m_2 g l_{g_2} \sin \phi \quad (10)$$

Based on the L-E equation, the equations of motion of the system are derived. The matrix form of these equations of motion is given in equation (11).

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 l_{g_1}^2 + I_1 + m_2 l_1^2 & m_2 l_1 l_{g_2} \cos(\phi - \theta_1) \\ m_2 l_1 l_{g_2} \cos(\phi - \theta_1) & m_2 l_{g_2}^2 + I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$- \begin{bmatrix} 0 & -(m_2 l_1 l_{g_2}) \dot{\phi} \sin(\phi - \theta_1) \\ m_2 l_1 l_{g_2} \dot{\theta}_1 \sin(\phi - \theta_1) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} m_1 g l_{g_1} + m_2 g l_1 \cos \theta_1 \\ m_2 g l_{g_2} \cos \phi \end{bmatrix}$$

Finally, the matrix-vector representation of the equation of motion is given in equation (12).

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (12)$$

3.3. MATLAB/Simulink Modelling of the System

After the design of the robot arm system was completed in Solidworks program, the system was transferred to MATLAB Simulink environment (MathWorks, 2003-2020). The appearance of the design of the robot arm system created in Solidworks environment is given in Figure 2.



Figure 2: 3D view of the robot arm.

By transferring the designed robot arm to the Simulink environment, the basic block diagram schematic of the robot arm system was created by MATLAB Simulink. The basic block diagram of the robot arm provided by Simulink is given in Figure 3.

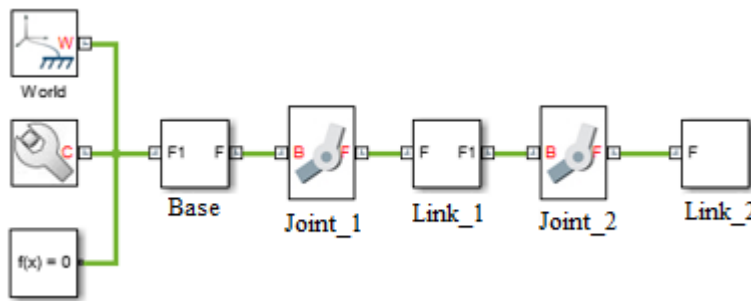


Figure 3: Basic block diagram of the robot arm.

In the basic block diagram of the robot arm given in Figure 3, the blocks representing the parts of the robot arm model can be expressed as follows; "Base" represents the base part of the robot arm system, "Joint_1" represents the joint where the angle θ_1 is applied, "Link_1" represents the first link of the robot arm system, "Joint_2" represents the joint where the angle θ_2 is applied and "Link_2" represents the second link of the robot arm system. The angles θ_1 and θ_2 are controlled by sensors. Counterclockwise is considered positive.

The forward kinematic physical model schematic of the robot arm with two degrees of freedom is given in Figure 4.

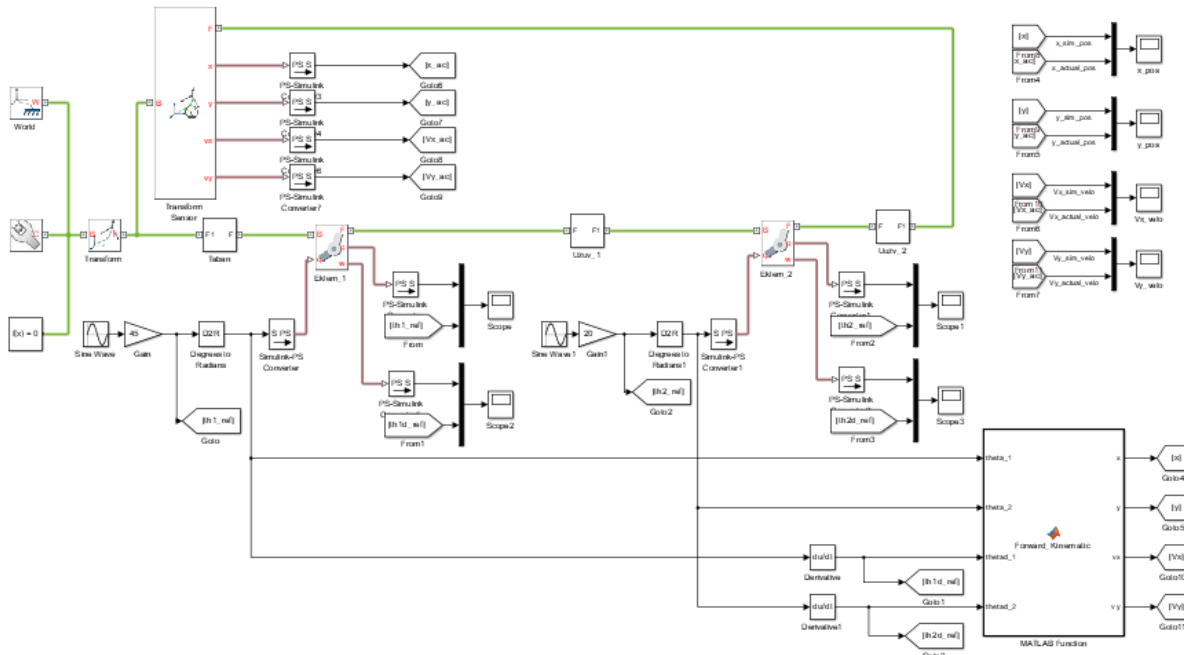


Figure 4: Two degrees of freedom robot arm forward kinematic modelling.

The forward kinematic mathematical modeling of the system was created by coding the forward kinematic equations of the robot arm system into the "Matlab Function" block in Figure 4. Physical model outputs (x_{ac} , y_{ac} , vx_{ac} , vy_{ac} , $v\dot{x}_{ac}$, $v\dot{y}_{ac}$) and mathematical model outputs (x , y , vx , vy) were compared with the help of scope blocks.

The inverse kinematic modeling of the robot arm system is given in Figure 5. For inverse kinematic modelling, two different trajectories are designed in which the end point of the robot arm is desired to follow. One of these trajectories allows the end point of the robot arm to move in a straight line, while the other allows it to move in a circle. In this way, the operational limits of the robot arm are determined. Then, the inverse kinematic mathematical modelling of the system was created with the inverse kinematic equations encoded in the function block. The "Robot Arm" block in Figure 5 represents the physical modeling of the robot arm system.

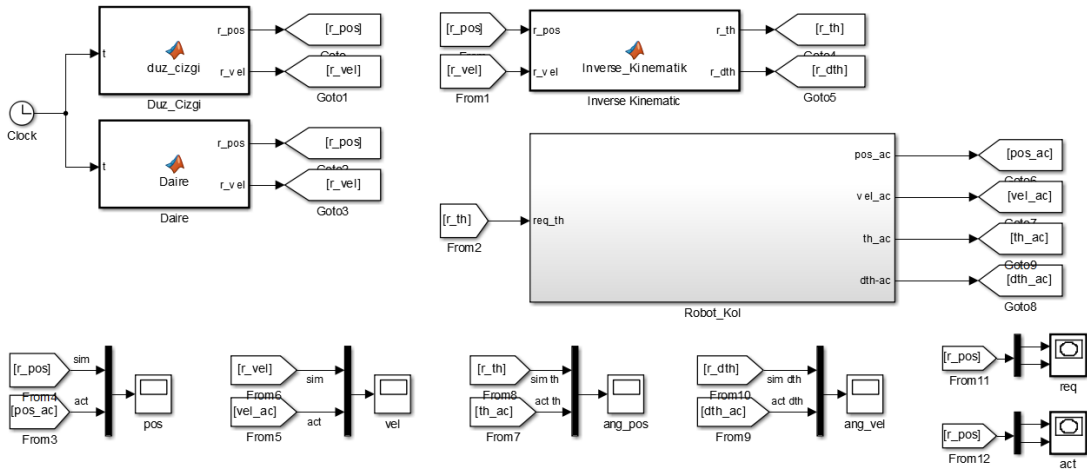


Figure 5: Two degrees of freedom robot arm inverse kinematic modelling.

The dynamic modeling of the robot arm system is given in Figure 6. During the dynamic modeling of the robot arm system, the mathematical modeling of the dynamic model was created by coding the equations of motion obtained with the L-E equation described in section 3.2 into the function block. The "Robot arm" block in Figure 6 represents the physical modeling of the robot arm system.

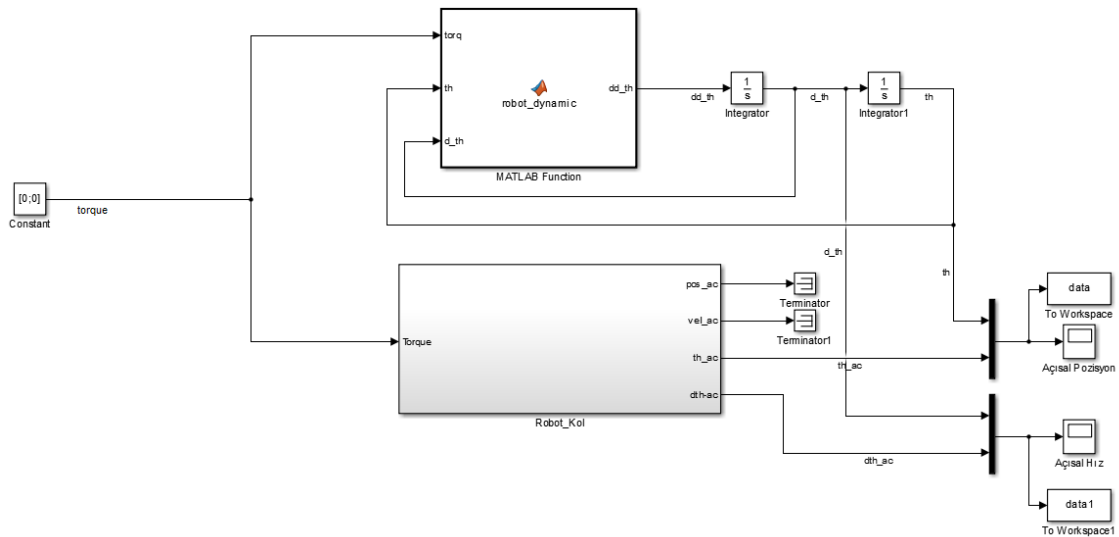


Figure 6: Two degrees of freedom robot arm dynamic modelling.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The mathematical model outputs and physical model outputs of both the kinematic model and the dynamic model of the robot arm system with two degrees of freedom are compared. The position outputs of the

mathematical models and physical models of the forward kinematic, inverse kinematic and dynamic systems were compared and checked for matching. The same process was repeated for velocity outputs.

The graph of the linear position outputs giving the position of the forward kinematic robot endpoint is given in Figure 7. The angle θ_1 applied to the mathematical model is the same as the angle θ_1 applied to the physical model. For the first joint of the robot arm to move 30 degrees, a $30 * \sin(5 * t)$ radian sine wave was applied to the first joint. Likewise, the value of the angle θ_2 applied to the mathematical model is the same as the value of the angle θ_2 applied to the physical model. For the second joint of the robot arm to move 20 degrees, a $20 * \sin(5 * t)$ radian sine wave was applied to the second joint.

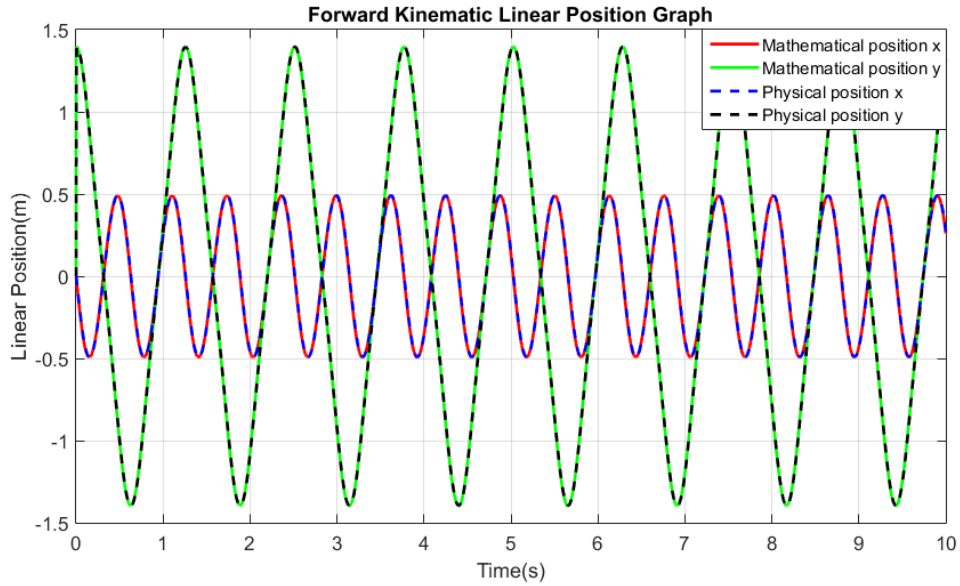


Figure 7: Forward kinematic linear position graph.

The graph of forward kinematic velocity outputs is given in Figure 8. The value of $\dot{\theta}_1$ applied to the mathematical model is the same as the value of $\dot{\theta}_1$ applied to the physical model. A $\frac{5*\pi}{6} * \cos(t)$ radian sine wave was applied to the first joint of the robot arm. Similarly, $\dot{\theta}_2$ applied to the mathematical model is the same as $\dot{\theta}_2$ applied to the physical model. A $\frac{5*\pi}{9} * \cos(t)$ radian sine wave was applied to the second joint of the robot arm. These applied velocities $\dot{\theta}_1$ and $\dot{\theta}_2$ are also the derivatives of the angles θ_1 and θ_2 .

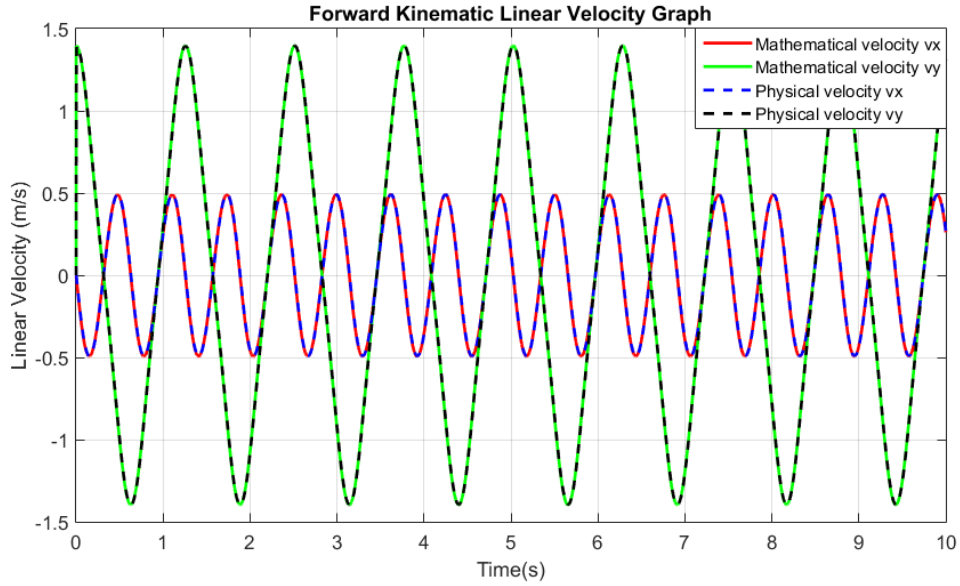


Figure 8: Forward kinematic linear velocity graph.

Inverse kinematics is a method to find the angle required to be in the desired position. In the two degrees of freedom robot arm system, x and y positions and linear velocities forming straight line and x and y positions and linear velocities forming circle were sent as input data to the mathematical and physical models. Thus, the angular positions and angular velocities required to obtain straight line and circle trajectories were achieved.

In the inverse kinematic model, the graph of the angular position outputs obtained by sending the input values required for the end point of the robot arm to follow the desired straight line trajectory to the mathematical and physical models is given in Figure 9.

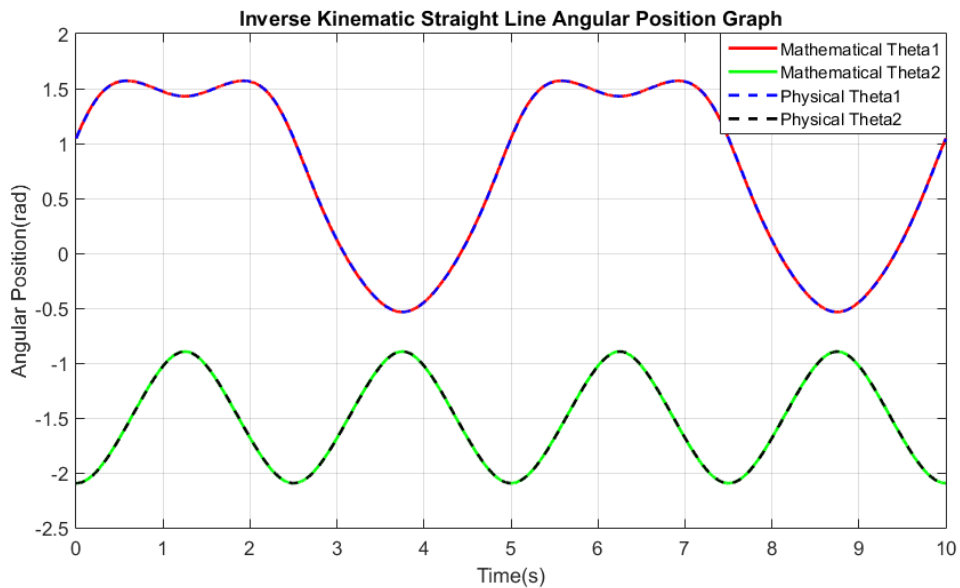


Figure 9: Graph of angular positions for straight line trajectory in inverse kinematics.

The graph of the angular velocity outputs obtained by sending the input values required for the robot arm to follow the straight line trajectory in the inverse kinematic model to the mathematical model and physical models is given in Figure 10.

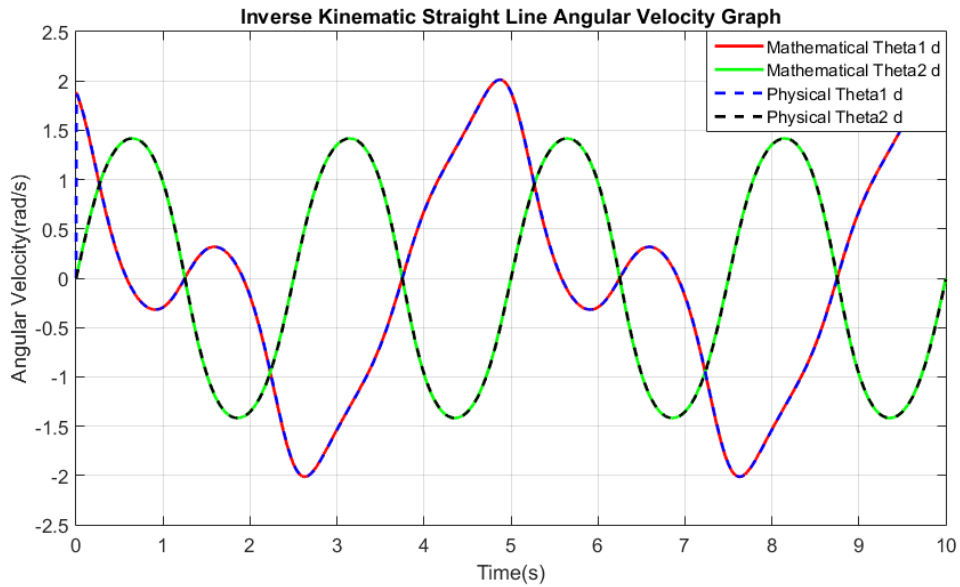


Figure 10: Graph of angular velocities for straight line trajectory in inverse kinematics.

In the inverse kinematic model, the graph of the angular position outputs obtained by sending the input values required for the end point of the robot arm to pursue the desired circle trajectory to the mathematical and physical models is given in Figure 11.

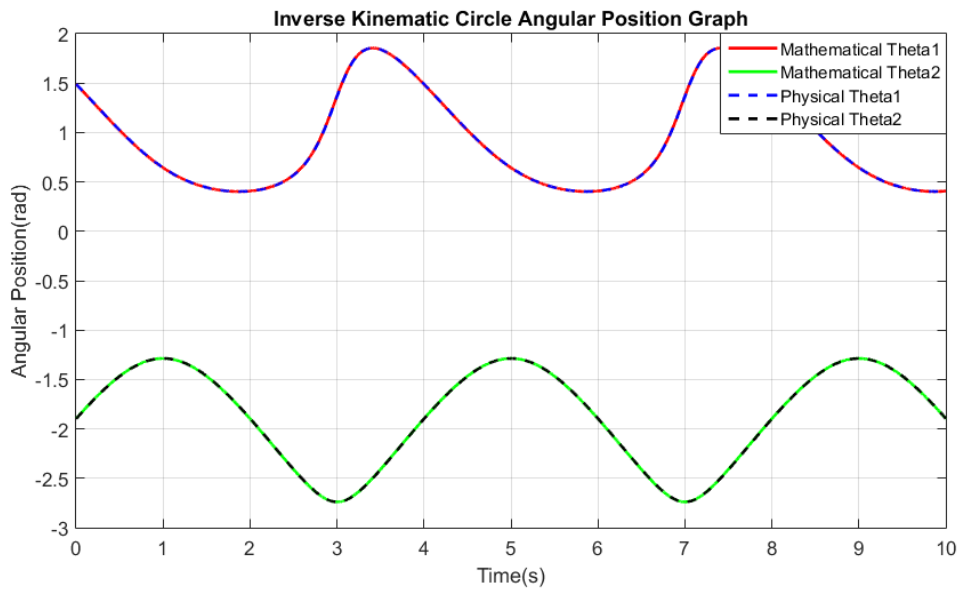


Figure 11: Graph of angular positions for circle trajectory in inverse kinematics.

The graph of the angular velocity outputs obtained by sending the input values required for the robot arm to follow the circle trajectory in the inverse kinematic model to the mathematical model and physical models is given in Figure 12.

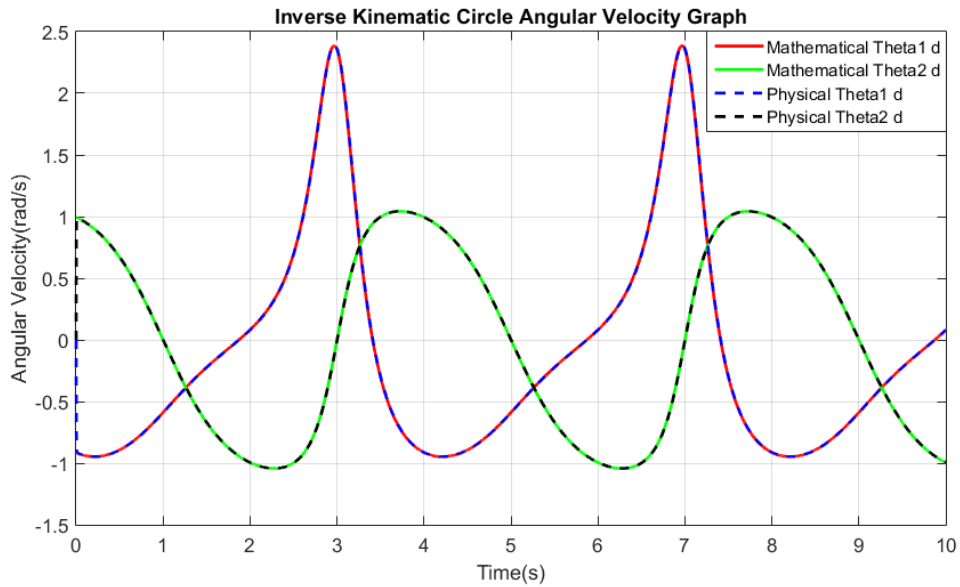


Figure 12: Graph of angular velocities for circle trajectory in inverse kinematics.

The input torque value applied to the mathematical model of the dynamic system is the same as the input torque value applied to the physical model. The angular position outputs of the dynamic system model of the robot arm are given in Figure 13.

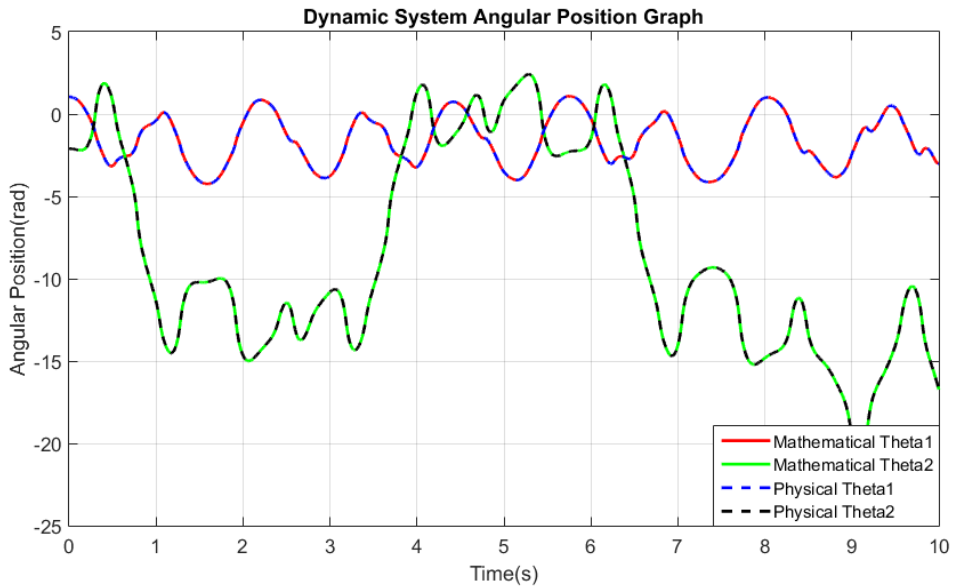


Figure 13: Dynamic system angular positions graph.

The velocity outputs of the dynamic system model of the robot arm system with two degrees of freedom are given in Figure 14.

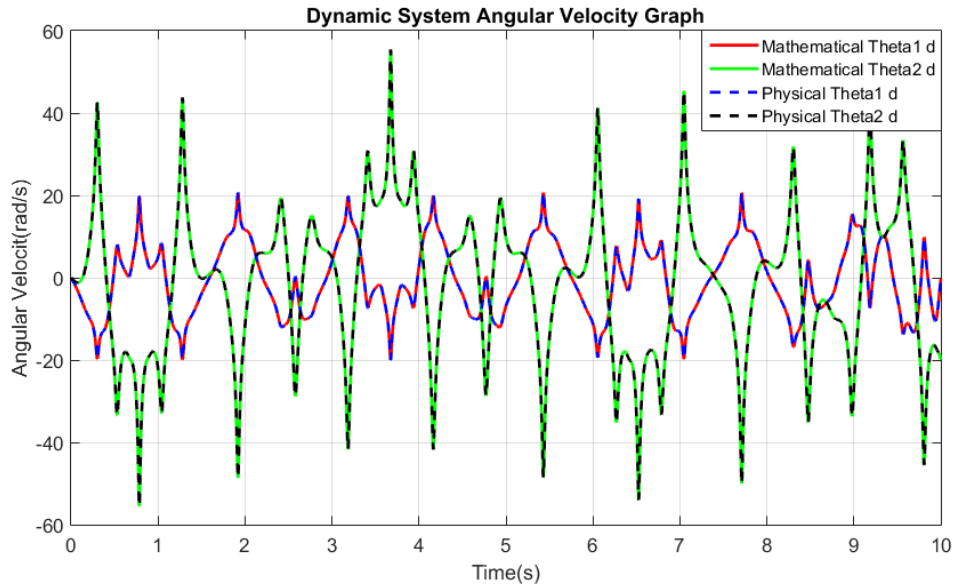


Figure 14: Dynamic system angular velocities graph.

5. CONCLUSION

In this study, firstly, a robot arm system with two degrees of freedom was designed in Solidworks and then this system was transferred to MATLAB Simulink and it was investigated whether the mathematical modeling and physical modeling matched. Different from other studies, dynamic modelling of the system was performed as well as kinematic modeling. The basic block diagram schematic required for the physical modeling of the robot arm system was obtained by transferring the robot arm system to MATLAB Simulink. Then the kinematic model and dynamic model systems were built with Simulink block diagrams on top of the basic block diagram scheme. The mathematical model of the robot arm system was created by writing the kinematic equations and dynamic equations of the two degrees of freedom system as code in function blocks in Simulink. Mathematical and physical models of the robot arm system were compared for forward kinematic, inverse kinematic and dynamic systems. While comparing the physical and mathematical models for the forward kinematic system, the same angle and velocity values were sent to the joints of the robot arm system and the trajectory followed by the endpoint of the robot arm was compared. When comparing the mathematical and physical model of the robot arm system in terms of the inverse kinematic system, two different trajectories that the robot arm endpoint expected to follow were created. When these trajectories were used as input values, it was checked whether the mathematical and physical models gave the same angular position and angular velocity values

as output. For the dynamic system tests, the same torque value was sent as input to both the mathematical model and the physical model and the angular position and angular velocity outputs were compared. As a result of the comparisons, it was seen that the linear position, linear velocity, angular position and angular velocity outputs of the mathematical and physical models of the two degrees of freedom robot arm system matched. It is observed that the results obtained from the mathematical equations and the results obtained from the sensors of the physical model created in the simulation environment coincide. In other words, the mathematical models of the system and the physical models produced the same outputs. This proves the accuracy of the physical model of the robot arm system.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

There is no conflict of interest among the authors.

CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

A.B.: Conceptualization, methodology, investigation, simulation, writing-original draft preparation.

G.T.: Methodology, supervision, validation, review and editing.

REFERENCES

- Aydın, M. (2022). Position Control of Slider Crank Mechanism. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(42), 158-162.
- Aydın, M. (2022). Real-Time PID Control of Three Degrees of Freedom RRR Type Robot Arm. In S.E. Ruşen & A. Ruşen (Eds.), *INSAC World Natural and Engineering Sciences* (pp. 243-256).
- Aydın, M. (2022). *Speed Control of Slider-Crank Mechanism*. Paper presented at Anadolu 10th International Conference on Applied Sciences, Diyarbakır, Türkiye .
- Barakat, A. N., Gouda, K. A., & Bozed, K. A. (2016). *Kinematics Analysis and Simulation of a Robotic Arm using MATLAB*. Paper presented at 4th International Connce on Control Engineering & Information Technology (CEIT - 2016). Hammamet, Tunisia.
- Craig, J. J. (2014). *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Harlow: Pearson.
- Ghaleb, N. M., & Aly, A. A. (2018). Modeling and Control of 2-DOF Robot Arm. *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 6(11), 24-31.
- Gürgüze, G., & Türkoğlu, İ. (2019). Kullanım Alanlarına Göre Robot Sistemlerinin Sınıflandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(31), 53-66.
- Hüseyinoğlu, M., & Abut, T. (2018). Dynamic Model and Control of 2 Dof Robotic Arm. *European Journal of Technic (EJT)*, 8(2), 141-150.
- Kebria, P. M., Al-wais, S., Abdi, H., & Nahavandi, S. (2016). *Kinematic and Dynamic Modelling of UR5 Manipulator*. Paper presented at 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Budapest, Hungary.
- Küçük, S., & Bingül, Z. (2004). Robot Sistemlerinde Kinematik Yöntemlerin Karşılaştırılması. *Politeknik Dergisi*, 7(2), 107-117.
- Küçük, S., & Birgül, Z. (2006). Robot Kinematics: Forward and Inverse Kinematics. In S. Cubero (Eds.), *Industrial Robotics Theory Modelling Control*. Pro Literatur Verlag, Germany / ARS, Austria.

Mahto, R. K., Kaur, J., & Jain, P. (2022). *Performance Analysis of Robotic Arm using Simulink*. Paper presented at 2022 IEEE World Conference on Applied Intelligence and Computing (pp. 508-512).

MathWorks. (2003-2020). *Simscape Multibody Link Reference*. The MathWorks Inc.

Okubanjo, A. A., Oyetola, O. K., Osifeko, M. O., Olaluwoye, O. O., & Alao, P. O. (2017). Modeling of 2 DOF Robot Arm and Control. *Futo Journal Series (FUTOJNLS)*, 3(2), 80-92.

Sahay, N., Chattopadhyay, S., & Chowdhury, T. (2020). *Simulation of Robot Arm Dynamics Using N-E Method of 2-Link Manipulator*. Paper presented at Fifth International Conference on Inventive Computation Technologies, Coimbatore, India.

Vivekanandan, P., Vishnu, A., Narayanasamy, S. K., & Yasodharan, R. (2019). Modelling, Simulation and Control of 5 Axis Industrial Robot using MATLAB. *Indian Journal of Science and Technology*, 12(23), 1-7.

Yıldırım, G. (2021). *3 Eksenli Bir Robot Kolun Kontrol Metotlarının İncelenmesi Ve Verimlilik Analizi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta.

Zhang, D., Ma, W., & Zhang, H. (2022). *Analysis and Simulation of Mechanical Arm Dynamics Model Based on Simulink*. Paper presented at 2nd International Conference on Algorithms, High Performance Computing and Artificial Intelligence (AHPCAI), Guangzhou, China.

Investigation of Anti-Alzheimer and Anti-diabetic Activity of Callus Culture of *Bellevalia edirnensis* ÖZHATAY & MATHEW: An Endemic Plant from Turkey

Burhan Ceylan^{1*}, Sergun Dayan², Eda Aydın³

¹Department of Pharmacognosy, Faculty of Pharmacy, Harran University, Şanlıurfa, Türkiye

²Department of Landscape Architecture, Faculty of Architecture, Trakya University, Edirne, Türkiye

³Institute of Natural and Applied Sciences, Trakya University, Edirne, Türkiye

Received: 19.07.2023, Accepted: 20.12.2023, Published: 31.12.2023

ABSTRACT

Callus culture, an alternative technique for the production of secondary metabolites, is a plant tissue culture method. In this study, it was aimed to determine the anti-alzheimer and anti-diabetic activity of ethanol extracts of callus tissue obtained from the Edirne hyacinth (*Bellevalia edirnensis* ÖZHATAY & MATHEW), which is endemic and is in danger of extinction. Callus induction started by sterilization of the seeds in 20% bleach and 70% ethanol. Following, it was achieved by culturing in MS medium containing (Murashige & Skoog) GA₃ in 3 different concentrations in addition to the medium supplemented with 7 g/L agar and 30 g/L sucrose. Anti-Alzheimer activity of the obtained calluses were determined using the Ellman method which is a spectrophotometric method. Anti-diabetic activities were determined using the α -glucosidase inhibition method. According to the results obtained, it was found that the callus culture of *Bellevalia edirnensis* ÖZHATAY & MATHEW showed moderate Anti-Alzheimer and Anti-diabetic activity

Keywords: Anti-Alzheimer Activity; Anti-diabetic Activity; *Bellevalia edirnensis*; Callus Culture

Bellevalia edirnensis ÖZHATAY & MATHEW: Türkiye Endemik Bitkisinin Kallus Kültürünün Anti-Alzheimer ve Anti-diyabetik Aktivitesinin Araştırılması

ÖZ

Sekonder metabolitlerin üretimi için alternatif bir teknik olan kallus kültürü, bir bitki doku kültürü yöntemidir. Bu çalışmada, endemik ve nesli tükenme tehlikesi altında olan Edirne sümbülünden (*Bellevalia edirnensis* ÖZHATAY & MATHEW) elde edilen kallus dokusunun etanol ekstraktlarının anti-alzheimer ve anti-diyabetik aktivitesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kallus indüksiyonu, tohumların % 20 çamaşır suyu ve % 70 etanol içerisinde sterilize edilmesiyle başladı. Ardından 7 g/L agar ve 30 g/L sükröz katkılı besiyerine ek olarak 3 farklı konsantrasyonda (Murashige ve Skoog) GA₃ içeren MS besiyerinde kültüre edilerek elde edildi. Elde edilen kallusların Anti-Alzheimer aktivitesi spektrofotometrik bir yöntem olan Ellman yöntemi kullanılarak belirlendi. Anti-diyabetik aktiviteler, α -glukozidaz inhibisyon yöntemi kullanılarak belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Anti-Alzheimer Aktivite; Anti-diyabetik Aktivite; *Bellevalia edirnensis*; Kallus Kültürü

1. INTRODUCTION

Secondary metabolites, like primary metabolites, are not responsible for performing the basic vital activities of the plant, but they have the functions of adapting plants to the environment and pollination, protection and maintaining their generation. Secondary metabolites from plants are divided into three major categories, phenolics, terpenes and alkaloids. As reported in previous studies, secondary metabolites have been reported to be responsible for numerous biological processes, including antioxidant, antimicrobial, anti-inflammatory, anticancer, anti-Alzheimer and antidiabetic (Mazid et al., 2011; Ceylan et al., 2021; Elansary et al., 2019). Turkey has a very wide flora due to climatic conditions and different altitudes. Most of these plants are aromatic and are widely used by the public in the treatment of many diseases. In order to sustain and spread the use of natural and healthy products, it is crucial to support traditionally used plants with new research and scientific publications (Serim et al., 2023; Ceylan & Yeşiloğlu, 2022). It is important to determine the metal contents (toxic compounds) of plants and compounds to be used as food products before activity determinations (Kaya et al., 2010; Kaplan et al., 2009).

The genus *Bellevalia* Lapeyr is represented by about 80 species, distributed mainly in the Mediterranean region. The genus *Bellevalia* has 33 species, 21 of which are endemic, in Turkey. As a result, Turkey has a 62.5% endemism rate of this kind. There are three *Bellevalia* species in Trakya, but only *Bellevalia edirnensis* ÖZHATAY & MATHEW (Asparagaceae) is classified as CR (critically endangered) by the IUCN (International Union for Conservation of Nature) (Uzunhisarcıklı et al., 2013). Plant tissue culture is the process of growing new tissues, plants, or plant products from plant pieces such as whole plants, cells, tissues, or organs in an artificial nutrient media under aseptic conditions. Callus culture, which is a tissue culture method, is expressed as structures with morphological irregularities formed as a result of the proliferation of organs or tissue parts cut from the primary plant in a semi-solid nutrient medium containing carbon source and plant growth regulators and not losing their division feature. It is stated that plant tissue culture methods have many application areas, as well as a suitable biotechnological approach for the study and synthesis of important secondary metabolites (Zhong, 2001).

It is stated that plant tissue culture methods have many application areas, as well as a suitable biotechnological approach for the study and synthesis of important secondary metabolites (Kurnaz-Yetim et al., 2022; Akkurt et al., 2020).

Alzheimer's disease is defined as the knotting of neurofibrils and the formation of amyloids associated with the loss of cholinergic neurons in regions of the brain related to learning and memory. Acetylcholine level decreases in Alzheimer's patients. One of the ways to treat this is by inhibition of the enzyme responsible for the hydrolysis of acetylcholine (acetylcholinesterase) (Ertaş et al., 2014; Kurnaz-Yetim et al., 2020).

Diabetes mellitus is a complex illness that can cause serious complications. As a result, the treatment incorporates a variety of therapeutic modalities. In diabetic patients, postprandial hyperglycemia occurs after a meal due to glucose absorption from the gastrointestinal tract. In the case of postprandial hyperglycemia, which is typical in diabetics, preventing glucose uptake in the intestines and encouraging glucose uptake in tissues helps reduce the amount of blood glucose (Thilagam et al., 2013). When we look at the literature, it has been reported in the literature that karyosystematic, molecular cytogenetics, pollen mitosis and morphology and cytological and histological studies on the development of the reproductive system related to *B. edirnensis* (Johnson, 2003; Dane, 1999; Dane, 2006). In addition, no study findings regarding the *ex situ* and *in situ* conservation of this endemic and CR category species have been published. In this study, it was aimed to germinate seeds in order to protect the species *in vitro*, production of callus culture by means of embryo culture and onion scale culture and it was aimed to investigate the anti-diabetic and anti-Alzheimer activities of the obtained calluses *in vitro*.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1. Chemicals and Spectral Measurements

Acetylcholinesterase (AChE), 5,5'-dithiobis (2-nitrobenzoic) acid (DTNB), acetylthiocholine iodide (AcI) and butyrylthiocholine chloride (BuCl), phosphate buffer (pH 6.8-8.0), galantamine, *p*-nitrophenyl- α -D-glucopyranoside (*p*-NPG), genistein were obtained from Sigma Chemical Co. (Sigma-Aldrich GmbH, Sternheim, Germany). α -glucosidase, dimethyl sulfoxide (DMSO), methanol, ethanol were purchased from Merck (Darmstadt, Germany). The BioTek Power Wave XS (USA) 96-well microplate was used for the bioactivity measurements. Utilizing Gen5 Data Analysis software, the measurements and computations of the activity data were assessed.

2.2. Plant Material and Callus Culture Procedure

B. edirnensis seeds were collected from Küçükkararlı Village grassland (Tekirdağ Province) in June 2019. The seeds stored at +4 °C for 3 months were sterilized by first soaking in 20% commercial bleach solution for 15 minutes and then shaking in 70% ethanol solution for 4 minutes. Afterwards, they were rinsed 5 times with sterile distilled water and left to swell for 72 hours. Matured embryos isolated from swollen seeds were transferred to Murashige & Skoog (MS including vitamins, Duchefa Biochemie, M0222) basal nutrient medium (pH 5.8) containing 1 mg/L α -Naphthalene Acetic Acid (NAA, Duchefa Biochemie, N0903), 30 g/L Sucrose (Duchefa Biochemie, S0809) and 7 g/L Plant Agar (Duchefa Biochemie, P1001). 50 petri dishes each containing 5 embryos were incubated at 4 °C in the dark for 1 week. Then, cultures were taken into the growth chamber at 25 \pm 2 °C and kept in the dark for 1 month and then in 12/12 h light/dark photoperiod. Callus cultured were subcultured on the same nutrient medium once a month for 6 months. Calluses formed

during this period were transferred to MS basal nutrient medium containing 1 mg/L NAA, 1 mg/L 6-Benzylaminopurine (6-BAP, Duchefa Biochemie, B0904), 30 g/L Sucrose and 7 g/L Plant Agar for biomass increase. Yellowish colored friable callus tissues with a weight of 1 g and above were selected and used for extraction procedures.

2.3. Chemicals and Spectral Measurements

The spectrophotometric technique created by Ellman *et al.* was slightly modified to evaluate the inhibitory activities of acetyl-cholinesterase (Ellman, *et al.*, 1961). The reaction's substrates were acetylthiocholine iodide and DTNB was employed to gauge the anticholinesterase activity. Methanol was used to dissolve each callus culture in order to create stock solutions at a concentration of 4000 g/mL. The following ingredients were combined and incubated for 15 minutes at 25 °C: 150 microliters of 100 mM sodium phosphate buffer (pH 8.0), 10 g/mL of sample solution, 20 µL of AChE enzyme solution, and 10 g/mL of DTNB. Acetylthiocholine iodide 10 g/mL was then added to start the reaction. The callus culture's final concentration in solution was 10, 25, 50, and 100 g/mL. The production of yellow 5-thio-2-nitrobenzoate anion with a wavelength of 412 nm, which occurs when DTNB reacts with thiocholine produced by the enzymatic hydrolysis of acetylthiocholine iodide, served as a marker for the hydrolysis of these substrates. The samples and controls were dissolved in methanol, which served as a solvent. Galantamine was used as standard.

2.4. Chemicals and Spectral Measurements

The callus culture was evaluated for the inhibition of *Saccharomyces cerevisiae*'s β -glucosidase using a technique somewhat modified by Tsujii *et al.* (Tsujii *et al.*, 1996). In a nutshell, a 40 L solution of β -glucosidase (3.0 U/mL, dissolved in phosphate buffer, pH 6.8) was pre-incubated at 37 °C for 30 min with 10 L of each callus culture in DMSO. P-nitrophenyl-D-glucopyranoside (p-NPG; final concentration 0.5 mM) was added to the mixture to start the enzymatic reaction, which continued for another 30 minutes. Monitoring the p-nitrophenol produced from p-NPG at 405 nm allowed researchers to ascertain the β -glucosidase activity. The positive control utilized was genistein.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Anti-Alzheimer Activity

Acetylthiocholine iodide is utilized as the substrate and acetylcholinesterase enzyme is employed as the inhibitor of acetylcholinesterase activity. The reaction is based on the formation of the yellow 5-thio-2-nitrobenzoate anion with DTNB of the thiocholine formed as a result of the acetylcholine iodide

decomposition by the acetylcholinesterase enzyme and its spectrophotometric measurement at 412 nm. The standard is galantamine, an isolated alkaloid substance from the *Galanthus* plant. Ethanol was used as a control. Anticholinesterase activity was calculated as % inhibition relative to control using the following equation.

$$\% \text{ inhibition} = (A_{\text{control}} - A_{\text{sample}} / A_{\text{control}}) \times 100$$

A_{control} = Ethanol absorption

A_{sample} = Callus culture extracts

Callus tissue cultures showed anti-Alzheimer activity in direct proportion to the increase in concentration (Figure 1). According to Table 1, although galantamine was used as a standard, it did not show 100% inhibition. Therefore, assuming 100% inhibition of galantamine, callus culture extracts showed moderate anti-alzheimer's activity relative to galantamine.

Table 1: Anticholinesterase inhibition of callus culture extracts and standard.

Concentration $\mu\text{g mL}^{-1}$	% inhibition of callus culture extracts	% inhibition of galantamine
10	18.87±1.11	84.81±0.27
25	26.16±0.27	83.67±0.17
50	34.14±0.54	83.09±0.23
100	48.86±1.42	81.75±0.76

Values are given as the mean and standard deviation of three parallel measurements.

3.2. Anti-diabetic Activity

A class of medications used to treat diabetes prevents the conversion of carbohydrates into glucose by blocking the enzymes -amylase and -glucosidase, which are involved in the breakdown of carbohydrates in metabolism. Extracted callus tissue cultures were made according to the method described for inhibition of α -glucosidase from *Saccharomyces cerevisiae*. Genistein was used as a standard. The control group was analyzed by replacing samples with phosphate buffer. α -glucosidase inhibition activity was calculated as % inhibition relative to control using the following equation.

$$\% \text{ inhibition} = (A_{\text{control}} - A_{\text{sample}} / A_{\text{control}}) \times 100$$

A_{control} = Phosphate buffer

A_{sample} = Callus culture extracts

Callus tissue cultures showed anti-diabetic activity in direct proportion to the increase in concentration (Figure 1). According to Table 2, although genistein was used as a standard, it did

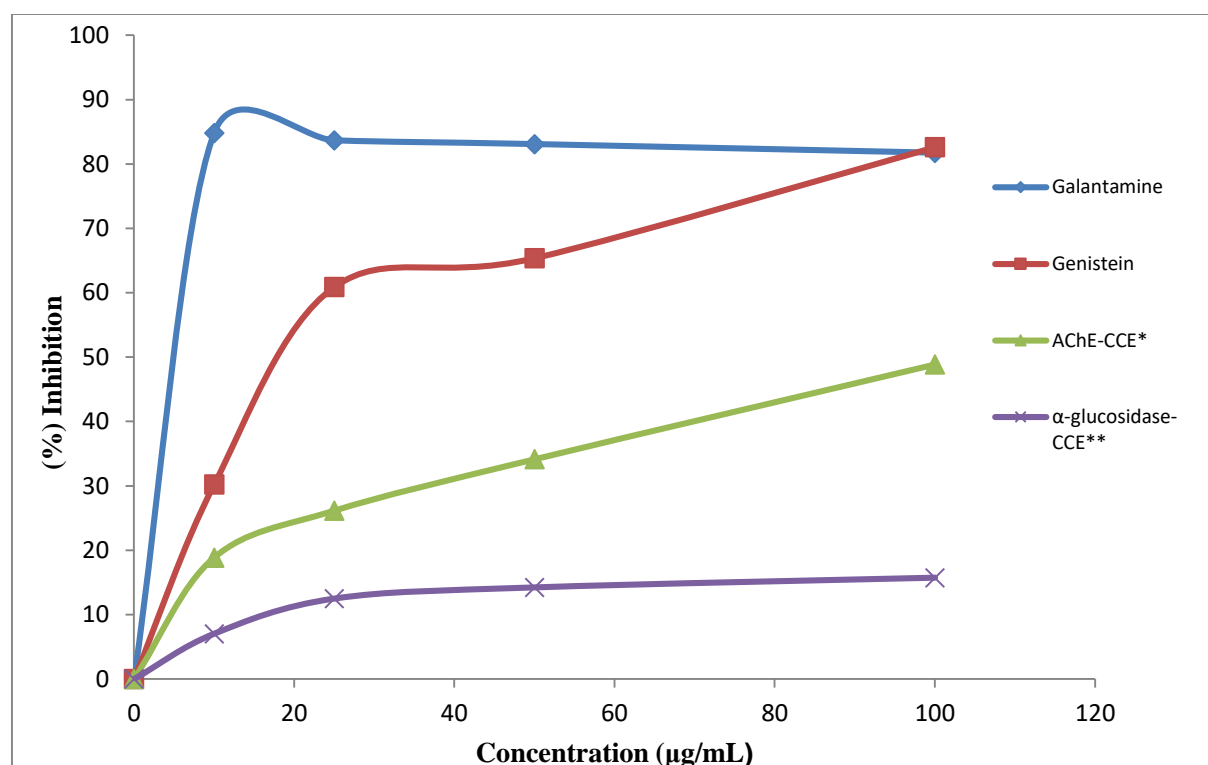
not show 100% inhibition. Therefore, assuming 100% inhibition of genistein, callus culture extracts showed moderate anti-alzheimer's activity relative to genistein.

Table 2: α -glucosidase inhibition of callus culture extracts and standard.

Concentration $\mu\text{g mL}^{-1}$	% inhibition of callus culture extracts	% inhibition of genistein
10	7.03 \pm 1.11	30.21 \pm 0.27
25	12.48 \pm 0.27	60.90 \pm 0.17
50	14.21 \pm 0.54	65.38 \pm 0.23
100	15.72 \pm 1.42	82.62 \pm 0.76

Values are given as the mean and standard deviation of three parallel measurements.

In previous studies, IC_{50} values in the cytotoxic activity of *Bellevalia longipes* ranged from 0.62 to 5.35 μM (El-Elimat et al., 2022). In another study, MIC values of antimicrobial activity of different extracts *Bellevalia eigii* were between 17 to 25 $\mu\text{g/mL}$ (Alali et al., 2015).



*: Anticholinesterase inhibition of callus culture extracts, **: α -glucosidase inhibition of callus culture extracts

Figure 1: % inhibition of callus culture extracts and standards.

4. CONCLUSION

Callus tissue culture, which is used in the production of secondary metabolites, is an alternative method to traditional cultivation and chemical methods for the production of cosmetic, pharmaceutical or agriculturally valuable compounds. Production of secondary metabolites by callus tissue culture method is advantageous in many aspects. Secondary metabolites obtained by callus tissue culture from *B. edirnensis* ÖZHATAY & MATHEW plant showed moderate anti-Alzheimer and anti-diabetic activity. The data obtained from this study showed that the secondary metabolites obtained from the *B. edirnensis* plant by tissue culture method can be used in the isolation of the new active ingredient, in extracts or for commercial purposes.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

Conflicts of Interest/Competing Interests There is no conflict of interest between authors and any kind of organisation.

CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

B.C.: Conceptualization, methodology, software, validation, formal analysis, investigation, resources, writing-original draft preparation and editing.

S.D.: Conceptualization, methodology, formal analysis, investigation, resources, writing-original draft preparation.

E.A.: Conceptualization, formal analysis, investigation, resources, writing-original draft preparation.

REFERENCES

- Mazid, M., Khan, T., & Mohammad F. (2011). Role of secondary metabolites in defence mechanisms of plants. *Biology and Med.*, 3(2), 232-249.
- Ceylan, B., Tiris, G. & Kepekci Tekkeli E. (2021). A new HPLC method with UV detection for the determination of carnosol in human plasma and application to a pharmacokinetic study. *Chromatoraphia.*, 89(9), 855-860.
- Elansary, H.O., Szopa, A., Kubica, P., Al-Mana, F.A., Mahmoud, E.A., El-Abedin, T.K.A.Z., Mattar, M.A., & Ekiert, H. (2019). Pheolic compounds of *Catalpa speciosa* *Taxus cuspidate*, and *Magnolia acuminata* have antioxidant and anticancer activity. *Molecules*, 24(3), 412.
- Serim, E., Ceylan, B., & Tekkeli Kepekci S.E. (2023). Determination of apigenin in cosmetics containing chamomile by High-Performance Liquid Chromatography with Ultraviolet Detection (HPLC-UV). *Analytical Letters*, 56(13), 2113-2122.
- Ceylan, B., & Yeşiloğlu Y. (2022). Investigation of antioxidant activity of *Sorbus domestica* L. extracts and determination of phenolic contents by LC-MS/MS. *Revue Roumaine De Chimie*, 67(6-7), 343-351.
- Kaya, G., Ozcan, C. & Yaman, M. (2010). Flame atomic absorption spectrometric determination of Pb, Cd, and Cu in

Pinus nigra L. and *Eriobotrya japonica* leaves used as biomonitors in environmental pollution. *Bulltein of Environmental Contamination and Toxicology*, 84, 191-196.

Kaplan, O., Kaya, G., Ozcan, C., Ince, M., & Yaman, M. (2009). Acrylamide concentrations in grilled foodstuffs of Turkish kitchen by high performance liquid chromatography-mass spectrometry. *Microchemical Journal*, 93(2), 173-179.

Uzunhisarcıklı, M.E., Duman, H., & Yılmaz, S. (2013). A new species of *Bellevalia* (Hyacinthaceae) from Turkey, Doga. *Turkish Journal Botany*, 37(4), 651-655.

Zhong, J.J. (2001). Biochemical engineering of the production of plant-specific secondary metabolites by cell suspension cultures. *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.*, 72, 1-26.

Yetim-Kurnaz, N., Hasanoğlu-Özkan, E., Akkurt, N., & Koç, M.M. (2022). Catalytic performance of Fe₃O₄@g2-Pamam/MoO₃ magnetic nanocomposites for degradation of 4-Np to 4-Ap. *Journal of Materials and Electronic Devices*, 3(1), 1-6.

Akkurt, N., Hadi-Aljumaili, M., Ocak, H., Cakar, F., & Torun, L. (2020). Synthesis and liquid crystalline properties of new triazine-based π -conjugated macromolecules with chiral side groups. *Turkish Journal of Chemistry*, 44(3), 726-735.

Ertaş, A., Gören, A.C., Boğa, M., Yeşil, Y., & Kolak, U. (2014). Essential oil compositions and anticholinesterase activities of two edible plants *Tragopogon latifolius* var. *angustifolius* and *Lycopsis orientalis*. *Natural Product Research*, 28(17), 1405-1408.

Kurnaz-Yetim, N., Hasanoğlu-Özkan, E., Özcan, C., & Sarı, N. (2020). Preparation of AChE immobilized microspheres containing thiophene and furan for the determination of pesticides by the HPLC-DAD method. *Journal of Molecular Structure*, 1222, 128931.

Thilagam, E., Parimaladevi, B., Kumarappan, C., & Mandal, S.C. (2013). α -Glucosidase and α -amylase inhibitory activity of *Senna surattensis*. *J. Acupunct Meridian Stud.*, 6(1), 24-30.

Jonhson, M.A.T. (2003). Polyploidy and karyotype variation in Turkish *Bellevalia* (Hyacinthaceae). *Botanical J. Linnean Soc.*, 143(1), 87-98.

Dane, F. (1999). Hekzaploid (2n=24) *Bellevalia edirnensis* Özhatay & Mathew'in polen mitozu ve polen morfolojisinin incelenmesi. *Turkish J. Bio.*, 23(3), 357-368.

Dane, F. (2006). Cytological and histological studies on reproductive system of hexaploid *Bellevalia edirnensis* Ozhatay & Mathew (Hyacinthaceae), *Acta Biol. Hung.*, 57(3), 339-354.


Ellman, G.L., Courtney, K.D. Andress, V.J. & Feather-Stone, R.M. (1961). A new and rapid colorimetric determination of acetylcholinesterase activity. *Biochem. Pharmacol.*, 7, 88-95.

Tsujii, E., Muroi, M., Shiragami, N. & Takatsuki, A. (1996). Nectrisine is a potent inhibitor of alpha-glucosidases, demonstrating activities similarly at enzyme and cellular levels. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 220(2), 459-466.

El-Elimat, T., Al-Qiam, R., Burdette, J.E., Sharie, A.H., Al-Gharaibeh, M., & Oberlies, N.H. (2022). Homoisoflavonoids from the bulbs of *Bellevalia longipes* and assessment of their potential cytotoxic activity. *Pyhtochem*. 203, 113343.

Alali, F., El-Elimat, T., Albataineh, H., Al-Balas, Q., Al-Gharaibeh, M., Fankinham, J.O., Chen, W.L., Swanson, S.M., & Oberlies, N.H. (2015). Cytotoxic homoisoflavones from the bulbs of *Bellevalia eigii*. *J. Nat. Product*. 78(7), 1708-1715.

A Different Perspective for Geometric Series with Binomial Coefficients

Chinnaraji Annamalai¹ , Özen Özer^{2*} 

¹ School of Management, Indian Institute of Technology, Kharagpur, India

^{2*} Department of Mathematics, Faculty of Science and Arts, Kırklareli University, 39100, Kırklareli, Turkey.

Received: 28.07.2023, Accepted: 20.12.2023, Published: 31.12.2023

ABSTRACT

The study of mathematical series has long been a fascinating and essential component of mathematics, providing valuable insights into numerous real-world applications and theoretical concepts. Among the various types of series, the "Geometric Series with Binomial Coefficients" stands out as a particularly intriguing and powerful subject of investigation.

A geometric series is a sequence of terms in which each successive term is obtained by multiplying the previous one by a constant factor, known as the common ratio. This classical concept has found extensive applications in fields like finance, physics, engineering, and computer science, making it an indispensable tool for solving a wide array of problems.

However, in the context of the "Geometric Series with Binomial Coefficients," we encounter a fascinating twist that elevates the complexity and versatility of the series. Instead of dealing with constant factors as in the traditional geometric series, the coefficients in this new variant are given by the binomial coefficient formula. Binomial coefficients, also known as "n choose k," are fundamental in combinatorial mathematics and represent the number of ways to choose k elements from a set of n elements.

This work presents a new approach for the computation to geometric series with binomial coefficients. The geometric series with binomial coefficients is derived from the multiple summations of a geometric series. In this article, several theorems and corollaries are established on the innovative geometric series and its binomial coefficients to get practical way for calculations.

MSC Classification codes : 11B65, 05A10, 65B10, 40A05

Keywords: Binomial coefficients; Factorials; Geometric series; Combinatorial functions; Numerical summation of series; Convergence and divergence of series and sequences; Computations.

Binom Katsayılı Geometrik Serilere Farklı Bir Bakış

ÖZ

Matematiksel serilerin incelenmesi, matematiğin uzun süredir büyüleyici ve temel bir bileşeni olmuştur ve birçok gerçek dünya uygulaması ve teorik kavramlar konusunda değerli içgörüler sunmaktadır. Çeşitli seriler arasında, "Binom Katsayılı Geometrik Seri", özellikle ilgi çekici ve güçlü bir araştırma konusu olarak ön plana çıkar.

Geometrik bir seri, her bir ardışık terimin bir öncekinin bir sabit çarpanla çarpılmasıyla elde edildiği bir terim dizisidir; bu sabit çarpana "ortalama oran" denir. Bu klasik kavram, finans, fizik, mühendislik ve bilgisayar bilimleri gibi birçok alanda geniş uygulama alanı bulmuş olup, geniş bir yelpazedeki problemlerin çözümünde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

Ancak, "Binom Katsayılı Geometrik Seri" bağlamında, serinin karmaşıklığını ve çok yönlülüğünü artıran büyüleyici bir farkla karşılaşırız. Geleneksel geometrik serilerdeki gibi sabit çarpanlarla uğraşmak yerine, bu yeni türe göre katsayılar, binom katsayısı formülü tarafından belirlenir. Binom katsayıları, kombinatorik matematikte temel bir rol oynar ve n elemandan oluşan bir kümeden k eleman seçmenin kaç farklı yol olduğunu temsil eder.

Bu çalışma, binom katsayılı geometrik serilerin hesaplanması için yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Binom katsayılı geometrik seriler, geometrik serilerin çeşitli toplamlarından elde edilir. Bu makalede, hesaplamalarda pratik bir yol elde etmek amacıyla yenilikçi geometrik seriler ve onun binom katsayıları üzerine çeşitli teoremler ve sonuçlar oluşturulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Binom katsayıları; Faktöriyeller; Geometrik seriler; Kombinatoriyal fonksiyonlar; Serilerin sayısal toplamı; Seri ve dizilerin yakınsaklığı ve ıraksaması; Hesaplamalar.

1. INTRODUCTION

The study of this subject involves various approaches and methods to understand and analyze its properties, convergence behavior, and applications. There are some common approaches and methods used in exploring this topic as follows:

The fundamental starting point for studying the geometric series with binomial coefficients is the binomial coefficient formula, also known as "n choose k." This formula calculates the number of ways to choose k elements from a set of n elements. Understanding the properties and applications of binomial coefficients lays the groundwork for working with geometric series featuring these coefficients.

The problem which is defined as Deriving closed-form expressions for geometric series with binomial coefficients is a crucial aspect of the analysis. Researchers often seek algebraic formulas that succinctly express the sum of such series, allowing for efficient computations and theoretical insights. Various mathematical techniques, such as combinatorial identities, generating functions, and calculus, can aid in finding closed-form expressions.

For convergence of the series, investigating the convergence behavior of geometric series with binomial coefficients is essential to ascertain when such series converge or diverge. Analyzing the relationship between the common ratio (determined by binomial coefficients) and the series sum can help determine under what conditions the series converges to a finite value. Geometric series with binomial coefficients can often be described using recurrence relations, where each term in the series depends on previous terms. Developing and solving these recurrence relations can provide valuable insights into the long-term behavior of the series.

Moreover, geometric series with binomial coefficients find applications in probability and statistics, particularly in problems related to counting and probability distributions. Techniques from probability theory and combinatorial analysis are frequently employed to tackle such problems. As binomial coefficients have a strong connection to combinatorial mathematics, researchers frequently draw on combinatorial techniques to analyze and understand the properties of geometric series with binomial coefficients. Generating functions provide a powerful tool for studying combinatorial structures and series. By defining generating functions for geometric series with binomial coefficients, researchers can efficiently compute coefficients, derive closed-form expressions, and explore various combinatorial properties.

Differential equations can arise when studying certain types of geometric series with binomial coefficients. By formulating and solving relevant differential equations, researchers can gain insights into the behavior of the series. Also, mathematical induction is a common technique used to prove statements about geometric series with binomial coefficients. By establishing base cases and proving the inductive step, researchers can verify properties that hold for all positive integers.

Also it is seen that there are many applications of the work in science and real life too. For example, Geometric series with binomial coefficients are used in financial mathematics to calculate future values of investments, annuities, and loans. They are also applicable in the field of option pricing and risk assessment. Binomial coefficients are fundamental in combinatorial mathematics, and their use in geometric series extends to various combinatorial problems. These applications can include counting the number of paths in graphs, arrangements of objects, and partitioning sets into subsets.

Geometric series with binomial coefficients are utilized in various biological studies, such as understanding genetic inheritance patterns, population genetics, and analysing DNA sequences. Geometric series with binomial coefficients play a role in feature engineering, probability distributions, and analysing patterns in large datasets. In game theory, these series are used to model decision-making processes and strategies in competitive interactions. In the field of cryptography, binomial coefficients are used in various cryptographic algorithms and protocols to ensure security and confidentiality.

Astawa, Budayasa, and Juniati (2018) delve into the process of student cognition in constructing mathematical conjectures, likely related to binomial coefficients' properties or their applications. Che (2017) establishes a relation between binomial coefficients and Fibonacci numbers raised to higher powers, exploring a specific mathematical connection. Desh Ranjan, John E. Savage, and Mohammad Zubair (2011) discuss strong lower bounds for computation graphs related to binomial coefficients and Fast Fourier Transform (FFT), offering insights into computational complexity.

Echi (2006) explores the historical link between binomial coefficients and Nasir al-Din al-Tusi, providing a historical context for their study. Ferreira (2010) introduces the Integer Binomial Plan, a generalization involving factorials and binomial coefficients, extending their traditional application. Flusser and Francia (2000) focus on deriving and visualizing the binomial theorem, likely emphasizing graphical or visual representations of these coefficients. Gavrikov (2018) discusses properties of binomial coefficients and their application to growth modeling, showing their relevance in modeling real-world phenomena.

Goss (2011) presents an overview of the ongoing developments in the field of binomial coefficients, indicating a continuously evolving area of study. Harne, Badshah, and Verma (2015) explore polynomial identities related to binomial coefficients and Pascal's Triangle, likely providing new insights into their algebraic properties. Hwang (2009) offers a simple proof of the binomial theorem using differential calculus, showcasing alternative approaches to understanding and proving fundamental theorems. Khmel'nitskaya, van der Laan, and Talman (2016) discuss generalizations of binomial coefficients to numbers on graphs, possibly extending their application to graph theory.

Leavitt (2011) examines the complexity of Pascal's Triangle, likely shedding light on intricate patterns and structures within this mathematical construct. Lundow and Rosengren (2010) study the p, q -binomial distribution and its connection to the Ising model, bridging binomial coefficients with statistical physics.

Mazur (1997) contributes to conjectural mathematics, potentially involving conjectures related to binomial coefficients or related mathematical structures. Milenkovic, Popovic, Dimitrijevic, and Stojanovic (2019) explore binomial coefficients and their visualization, likely offering graphical representations or visualization techniques.

Norton (2000) discusses student conjectures in geometry, possibly involving hypotheses or conjectures related to geometric applications of binomial coefficients. Nurhasanah, Kusumah, and Sabandar (2017) exemplify mathematical abstraction using the concept of triangles, potentially demonstrating how binomial coefficients can be applied in diverse contexts. Ossanna (2015) investigates fractal dimensions within Pascal's Triangle under square-free moduli, exploring the fractal properties of binomial coefficients. Rosalky (2007) presents a simple probabilistic proof of the binomial theorem, offering an alternative proof method involving probability concepts. Ross (2010) and Rudin (1962) are textbooks likely offering foundational knowledge on probability theory and Fourier analysis, respectively, which may include sections on binomial coefficients within their contexts. All information can be found in the [1-35] references.

When the authors of this article was trying to compute the multiple summations of a geometric series, a new idea stimulated his mind to create a new type of geometric series. As a result, a geometric with binomial coefficients, called 'combinatorial geometric series', was developed with a new approach of binomial coefficient. In this study, we have obtained a useful formulation that enables very practical calculations by expressing a simpler writing on multiple sums of geometric series from a different perspective.

2. MAIN RESULTS

MULTIPLE SUMMATIONS OF GEOMETRIC SERIES

Before theorems, we can briefly remember the topic mentioned with different techniques in [1-35] with numerical examples given as follows:

Example 2.1. (Binomial Coefficients) Consider the combinatorial geometric series:

$$S = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} 2^k \tag{1}$$

This series arises when you expand $(1 + 2)^n$ using the binomial theorem. Let us calculate the series for a specific value of n . Then it is obtained that $S = 81$

So, when $n = 4$, the sum of this combinatorial geometric series is 81.

Note: A Fibonacci sequence is a series of numbers where each number is the sum of the two preceding ones. In mathematical terms, it can be defined as:

$$F(0) = 0, F(1) = 1 \text{ (initial conditions) and } F(n) = F(n-1) + F(n-2) \text{ for } n > 1 \tag{2}$$

To express the Fibonacci sequence as a combinatorial geometric series, we can use the following identity:

$$F(n) = (1/\sqrt{5}) \cdot \left(\left[\frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right]^n - \left[\frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right]^n \right) \tag{3}$$

where $(1 + \sqrt{5})/2$ is the golden ratio (approximately 1.61803398875). This expression is derived from the Binet formula for the Fibonacci sequence. So, it can be expressed the Fibonacci sequence as a combinatorial geometric series using the Binet formula as shown above.

Example 2.2. (Triple Summation of a Geometric Series) In a similar way, let us consider a triple summation:

$$S = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^q \sum_{k=0}^r 2^i \cdot 3^j \cdot 4^k \tag{4}$$

For $p = 1, q = 1$ and $r = 1$:

$$S = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 2^i \cdot 3^j \cdot 4^k \tag{5}$$

By calculating each term, we obtain $S = 135$. Thus, when $p = 1, q = 1$ and $r = 1$, the triple summation is 135.

In general [**Binomial Coefficient Geometric Series (n Choose r)**], if we consider a series where binomial coefficients $\binom{n}{r}$ are multiplied by a geometric progression:

$$S = \sum_{r=0}^n \binom{n}{r} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^r \tag{6}$$

and calculate it for $n = 4$, then we get

$$S = \binom{4}{0} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^0 + \binom{4}{1} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^1 + \binom{4}{2} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 + \binom{4}{3} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 + \binom{4}{4} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^4 = \frac{31}{16} \tag{7}$$

These are examples of multi-summations of geometric series, where the terms involve nested geometric series with different bases and different summation limits.

A geometric series with binomial coefficients [1-4, 18-29] is derived from the multiple summations of a geometric series. The binomial coefficient V_n^r is defined as a coefficient of x^k in the geometric series $\sum_{i=0}^n x^i$ ([5-17]).

Let us compute the multiple summations of a geometric series and its binomial coefficient based-geometric series.

$$\sum_{i_1=0}^n \sum_{i_2=i_1}^n \sum_{i_3=i_2}^n \dots \sum_{i_r=i_{r-1}}^n x^{i_r} = \sum_{i=0}^n V_i^r x^i, \text{ where } r \text{ refers to the total number of summations.}$$

Here, $\sum_{i_1=0}^n \sum_{i_2=i_1}^n \sum_{i_3=i_2}^n \dots \sum_{i_r=i_{r-1}}^n x^{i_r}$ denotes the $(r + 1)$ summations of a geometric series and

$\sum_{i=0}^n V_i^r x^i$ is the geometric series with binomial coefficient V_n^r , whose expansion is given below:

$$V_n^r = \frac{(n+1)(n+2)(n+3)\cdots(n+r)}{r!} \tag{8}$$

where r is a positive integer and n is a non-negative integer ([30-35]).

Remark: Note that $V_n^0 = V_0^0 = 0! = 1$ and $V_0^r = \frac{(0+1)(0+2)(0+3)\cdots(0+r)}{r!} = \frac{r!}{r!} = 1$.

If $r = 0$ in $\sum_{i=0}^n V_i^r x^i$, then $\sum_{i=0}^n V_i^0 x^i = \sum_{i=0}^n x^i$ is the single summation of a geometric series.

If $r = 1$, then $\sum_{i=0}^n V_i^1 x^i$ denotes the double summations of a geometric series, that is,

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=i}^n x^j = \sum_{j=0}^n x^j + \sum_{j=1}^n x^j + \cdots + \sum_{j=n}^n x^j = 1 + 2x + 3x^2 + \cdots + (n + 1)x^n = \sum_{i=0}^n V_i^1 x^i. \tag{9}$$

If $r = 2$, then $\sum_{i=0}^n V_i^2 x^i$ denotes the triple summations of a geometric series, that is,

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n \sum_{j=i}^n \sum_{k=i}^n x^k &= \sum_{j=0}^n \sum_{k=i}^n x^k + \sum_{j=1}^n \sum_{k=i}^n x^k + \sum_{j=2}^n \sum_{k=i}^n x^k + \cdots + \sum_{j=n}^n \sum_{k=i}^n x^k \\ &= \sum_{i=0}^n V_i^2 x^i. \end{aligned} \tag{10}$$

Similarly, the $(r + 1)$ summations of a geometric series (for $r = 0, 1, 2, 3, \dots$) is as follows [21-28]:

$$\sum_{i_1=0}^n \sum_{i_2=i_1}^n \sum_{i_3=i_2}^n \cdots \sum_{i_r=i_{r-1}}^n x^{i_r} = \sum_{i=0}^n V_i^r x^i. \tag{11}$$

As a different way and practically, it is satisfied that multi summation of geometric series can be also determined as follows:

Theorem 2.1: The following equation is provided for $n \in \mathbb{Z}_+$ values.

$$\sum_{i=0}^n V_i^{r+1} x^i = \sum_{i=0}^n V_i^r x^i + \sum_{i=1}^n V_{i-1}^r x^i + \sum_{i=2}^n V_{i-2}^r x^i + \cdots + \sum_{i=n}^n V_{i-n}^r x^i. \tag{12}$$

Proof: Let's show that the expression on the right-hand side of the theorem is equal to the expression on the left- hand side of the theorem.

$$\begin{aligned} &\sum_{i=0}^n V_i^r x^i + \sum_{i=1}^n V_{i-1}^r x^i + \sum_{i=2}^n V_{i-2}^r x^i + \cdots + \sum_{i=n-1}^n V_{i-(n-1)}^r x^i + \sum_{i=n}^n V_{i-n}^r x^i \\ &= (V_0^r + V_1^r x + V_2^r x^2 + V_3^r x^3 + \cdots + V_n^r x^n) + (V_0^r x + V_1^r x^2 + V_2^r x^3 + V_3^r x^4 + \cdots + V_{n-1}^r x^n) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+(V_0^r x^2 + V_1^r x^3 + V_2^r x^4 + V_3^r x^5 + \dots + V_{n-2}^r x^n) + \dots + (V_0^r x^{n-1} + V_1^r x^n) + V_0^r x^n \\
 = &V_0^r + (V_0^r + V_1^r)x + (V_0^r + V_1^r + V_2^r)x^2 + \dots + (V_0^r + V_1^r + V_2^r + V_3^r + \dots + V_n^r)x^n \\
 &(\text{Here, } V_0^r + V_1^r + V_2^r + \dots + V_n^r = V_n^{r+1} \text{ for } r = 0, 1, 2, 3, \dots) \\
 = &V_0^{r+1} + V_1^{r+1}x + V_2^{r+1}x^2 + V_3^{r+1}x^3 + V_4^{r+1}x^4 + \dots + V_{n-1}^{r+1}x^{n-1} + V_n^{r+1}x^n = \sum_{i=0}^n V_i^{r+1}x^i.
 \end{aligned}$$

Hence, theorem is proved.

As conclusions of the Theorem 2.1. following results can be given:

Corollary 2.1: The existence of the following equation is possible

$$\sum_{i=0}^n V_i^{r+1} = \sum_{i=0}^n V_i^r + \sum_{i=1}^n V_{i-1}^r + \sum_{i=2}^n V_{i-2}^r + \dots + \sum_{i=n}^n V_{i-n}^r \tag{13}$$

for $n \in \mathbb{Z}_+$ values.

Proof: Considering $x = 1$ and put into the Theorem 2.2, then Corollary 2.1 is obtained trivially.

Corollary 2.2: The equation given as below is provided for $n \in \mathbb{Z}_+ \cup \{0\}$.

$$V_n^{r+1} = V_0^r + V_1^r + V_2^r + \dots + V_{n-1}^r + V_n^r. \tag{14}$$

where $r = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Proof. Necessary proving is shown below for the Corollary 2.2.

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=n}^n V_i^{r+1}x^i &= \sum_{i=n}^n V_i^r x^i + \sum_{i=n}^n V_{i-1}^r x^i + \sum_{i=n}^n V_{i-2}^r x^i + \dots + \sum_{i=n}^n V_{i-(n-1)}^r x^i + \sum_{i=n}^n V_{i-n}^r x^i \\
 \Rightarrow V_n^{r+1}x^n &= V_n^r x^n + V_{n-1}^r x^n + V_{n-2}^r x^n + \dots + V_3^r x^n + V_2^r x^n + V_0^r x^n + \\
 \Rightarrow V_n^{r+1}x^n &= (V_n^r + V_{n-1}^r + V_{n-2}^r + \dots + V_3^r + V_2^r + V_0^r)x^n \\
 \Rightarrow V_n^{r+1} &= V_n^r + V_{n-1}^r + V_{n-2}^r + \dots + V_3^r + V_2^r + V_0^r \\
 \therefore V_n^{r+1} &= V_0^r + V_1^r + V_2^r + \dots + V_n^r
 \end{aligned} \tag{15}$$

where $r = 0, 1, 2, 3, \dots$

Theorem 2.2: The equality expressed below is satisfied for nonnegative n and r integer values;

$$\sum_{i=0}^n V_i^{r+1}x^i = V_0^r \sum_{i=0}^n x^i + V_1^r \sum_{i=1}^n x^i + V_2^r \sum_{i=2}^n x^i + V_3^r \sum_{i=3}^n x^i + \dots + V_n^r \sum_{i=n}^n x^i. \tag{16}$$

Proof. Let us prove this theorem using the following binomial expansion.

$$\sum_{i=0}^n V_i^{r+1}x^i = \sum_{i=0}^n V_i^r x^i + \sum_{i=1}^n V_{i-1}^r x^i + \sum_{i=2}^n V_{i-2}^r x^i + \dots + \sum_{i=n-1}^n V_{i-(n-1)}^r x^i + \sum_{i=n}^n V_{i-n}^r x^i.$$

The binomial expansion on the right-hand side of the equation is further expressed as follows:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^n V_i^r x^i + \sum_{i=1}^n V_{i-1}^r x^i + \sum_{i=2}^n V_{i-2}^r x^i + \cdots + \sum_{i=n}^n V_{i-n}^r x^i \\ &= (V_0^r x^0 + V_0^r x^1 + V_0^r x^2 + \cdots + V_0^r x^n) + (V_1^r x^1 + V_1^r x^2 + V_1^r x^2 + \cdots + V_1^r x^n) \\ &+ (V_2^r x^2 + V_2^r x^2 + V_2^r x^2 + \cdots + V_2^r x^n) + \cdots + V_n^r x^n. \end{aligned}$$

By simplifying this expression, we get

$$\sum_{i=0}^n V_i^{r+1} x^i = V_0^r \sum_{i=0}^n x^i + V_1^r \sum_{i=1}^n x^i + V_2^r \sum_{i=2}^n x^i + V_3^r \sum_{i=3}^n x^i + \cdots + V_{n-1}^r \sum_{i=n-1}^n x^i + V_n^r \sum_{i=n}^n x^i.$$

Proof is completed.

Following conclusion is extracted from the Theorem 2.2.

Corollary 2.3:

$$\sum_{i=0}^n V_i^{r+1} x^i = \sum_{i=0}^n (n + 1 - i) V_i^n. \tag{17}$$

Proof. Trivial... if $x = 1$ put into the Theorem 2.2, then result is obtained.

3. CONCLUSION

In conclusion, the study on combinatorial geometric series has yielded a valuable formulation that provides a fresh perspective on simplifying complex expressions involving multiple sums of geometric series. The research has introduced a practical approach for conducting calculations with greater ease and efficiency.

By reimagining the representation of multiple sums of geometric series, the study has contributed to the field's mathematical tools and problem-solving techniques. This new formulation can be particularly advantageous in various mathematical and scientific disciplines where these types of series commonly arise. The practicality of this formulation lies in its ability to streamline calculations that would otherwise be laborious and time-consuming. It offers researchers and practitioners a more accessible way to tackle problems that involve nested geometric series with combinatorial coefficients, saving both time and computational resources.

In summary, the study's achievement in providing a simplified and practical approach to handling combinatorial geometric series signifies a significant contribution to the field of mathematics and related disciplines. This novel perspective opens up new avenues for solving complex problems efficiently and enhances the toolbox of mathematicians, scientists, and researchers.

In this article, a technique has been introduced for computing the multiple summation of a geometric series into a single geometric series with binomial coefficients. Also, some theorems were provided using the geometric series.

DECLARATION

This study does not require ethics committee approval.

CONFLICT OF INTEREST

There is no conflict of authors in this work.

CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

C.A.: Methodology, formal analysis, investigation, resources, original draft preparation.

Ö.Ö.: Conceptualization, methodology, validation, formal analysis, investigation, resources, writing-review, extending and editing.

REFERENCES

- Annamalai, C. (2022) Application of Factorial and Binomial identities in Cybersecurity. SSRN Electronic Journal. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4115488>.
- Annamalai, C. (2022) Binomial Coefficients and Factorials for Non-Negative Real Numbers. SSRN Electronic Journal. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4375565>.
- Annamalai, C. (2022) Combinatorial Theorems in Factorials with Multinomial Computation. SSRN Electronic Journal. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4185700>.
- Annamalai, C. (2022) Factorials, Integers, Binomial Coefficient and Factorial Theorem. SSRN Electronic Journal. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4192717>.
- Astawa, I., Budayasa, I.K. and Juniati, D. (2018) The Process of Student Cognition in Constructing Mathematical Conjecture. *Journal on Mathematics Education*, 9, 15-26. <https://doi.org/10.22342/jme.9.1.4278.15-26>
- Che, Y. (2017) A Relation between Binomial Coefficients and Fibonacci Numbers to the Higher Power. 2016 2nd International Conference on Materials Engineering and Information Technology Applications (MEITA 2016), Qingdao, 24-25 December 2016, 281-284. <https://doi.org/10.2991/meita-16.2017.58>
- Desh Ranjan, John E. Savage, and Mohammad Zubair. (2011) Strong I/O Lower Bounds for Binomial and FFT Computation Graphs. In: *Computing and Combinatorics - 17th Annual International Conference, COCOON 2011, Dallas, TX, USA, August 14-16, 2011. Proceedings.* Ed. by Bin Fu and Ding-Zhu Du. Vol. 6842. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2011, pp. 134–145. doi: 10.1007/978-3-642-22685-4_12.
- Dunahm, W. (1990) *Journey through Genius: The Great Theorems of Mathematics*. Wiley, New York.
- Echi, O. (2006) Binomial Coefficients and Nasir al-Din al-Tusi. *Scientific Research and Essays*, 1, 28-32. <https://academicjournals.org/journal/SRE/article-full-text-pdf/7A2190112547>.
- Elmas, S. ÖZER, Özen and Hızarcı, S. (2020), Some Results on the Harmonic Special Series/ Analysis, *Academia Journal of Scientific Research* 8(6): 204-206, June 2020 *Academia Journal of (AJSR)*, DOI: 10.15413/ajsr.2020.0118, ISSN 2315-7712.
- Ferreira, L.D. (2010) Integer Binomial Plan: A Generalization on Factorials and Binomial Coefficients. *Journal of Mathematics Research*, 2, 18-35. <https://doi.org/10.5539/jmr.v2n3p18>
- Flusser, P. and Francia, G.A. (2000) Derivation and Visualization of the Binomial Theorem. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*, 5, 3-24. <https://doi.org/10.1023/A:1009873212702>
- Gavrikov, V.L. (2018) Some Properties of Binomial Coefficients and Their Application to Growth Modelling. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, 25, 38-43. <https://doi.org/10.1080/25765299.2018.1449346> <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/25765299.2018.1449346>.
- Goss, D. (2011) *The Ongoing Binomial Revolution*. <https://arxiv.org/pdf/1105.3513.pdf>
- Harne, S., Badshah, V.H. and Verma, V. (2015) Fibonacci Polynomial Identities, Binomial Coefficients and Pascal's Triangle. *Advances in Applied Science Research*, 6, 103-106.

- Hwang, L.C. (2009) A Simple Proof of the Binomial Theorem Using Differential Calculus. *The American Statistician*, 63, 43-44. <https://doi.org/10.1198/tast.2009.0009>
- Khmelnitskaya, A., van der Laan, G. and Talman, D. (2016) Generalization of Binomial Coefficients to Numbers on the Nodes of Graphs. Discussion Paper Vol. 2016-007, CentER (Center for Economic Research), Tilburg. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2732524>
- Kuhlmann, M.A. (2013) Generalizations of Pascal's Triangle: A Construction Based Approach. MS Theses, University of Nevada, Las Vegas, 1851.
- Leavitt, E. (2011) The Simple Complexity of Pascal's Triangle. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.468.8068&rep=rep1&type=pdf>
- Lundow, P.H. and Rosengren, A. (2010) On the p, q -Binomial Distribution and the Ising Model. *Philosophical Magazine*, 90, 3313-3353. <https://doi.org/10.1080/14786435.2010.484406>
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786435.2010.484406>
- Mazur, B. (1997) Conjecture. *Synthese*, 111, 197-210. <https://doi.org/10.1023/A:1004934806305>
- Milenkovic, A., Popovic, B., Dimitrijevic, S. and Stojanovic, N. (2019) Binomial Coefficients and Their Visualization. Proceedings of the Training Conference History of Mathematics in Mathematics Education, Jagodina, 26-30 October 2018, 41-45. <https://scidar.kg.ac.rs/bitstream/123456789/13117/1/>
- Norton, A. (2000) Student Conjectures in Geometry. 24th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education, Hiroshima, July 2000, 23-27.
- Nurhasanah, F., Kusumah, Y.S. and Sabandar, J. (2017) Concept of Triangle: Examples of Mathematical Abstraction in Two Different Contexts. *International Journal on Emerging Mathematics Education*, 1, 53-70. <https://doi.org/10.12928/ijeme.v1i1.5782>
- Ossanna, E. (2015) Fractal Dimension of Residues Sets within Pascal's Triangle under Square-Free Moduli.
- Rosalky, A. (2007) A Simple and Probabilistic Proof of the Binomial Theorem. *The American Statistician*, 61, 161-162. <https://doi.org/10.1198/000313007X188397>
- Ross, S (2010) *A First Course in Probability*. 8th Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River.
- RUDIN, W. (1962) *Fourier analysis on groups*, Interscience Publishing.
- Salwinski, D. (2018) The Continuous Binomial Coefficient: An Elementary Approach. *The American Mathematical Monthly*, 125, 231-244. <https://doi.org/10.1080/00029890.2017.1409570>
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00029890.2017.1409570>
- Stefanowicz, A. (2014) *Proofs and Mathematical Reasoning*. Mathematics Support Centre, University of Birmingham, Birmingham. <https://www.birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/college/stem/Student-Summer-Education-Internships/Proof-and-Reasoning.pdf>
- Su, X.T. and Wang, Y. (2012) Proof of a Conjecture of Lundow and Rosengren on the Bimodality of p, q -Binomial Coefficients. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 391, 653-656. <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2012.02.049>
- Usman, T., Saif, M. and Choi, J. (2020) Certain Identities Associated with (p, q) -Binomial Coefficients and (p, q) -Stirling Polynomials of the Second Kind. *Symmetry*, 12, Article No. 1436. <https://doi.org/10.3390/sym12091436>
- Varghese, T. (2017) Proof, Proving and Mathematics Curriculum. *Transformations*, 3, Article No. 3. <https://nsuworks.nova.edu/transformations/vol3/iss1/3>
- Yoon, M. and Jeon, Y. (2016) A Study on Binomial Coefficient as an Enriched Learning Topic for the Mathematically Gifted Students. *Journal of the Korean School Mathematics Society*, 19, 291-308.
- Zhu, M.H. and Zheng, J. (2019) Research on Transformation Characteristics of Binomial Coefficient Formula and Its Extended Model. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 7, 2927-2932. <https://doi.org/10.4236/jamp.2019.711202>

Vertical Distribution of Ants (Hymenoptera: Formicidae) in Ganos (Işık) Mountains

Ece ZAIMOGLU KUSCU¹, Nihat AKTAC¹, Yılmaz CAMLITEPE^{1*}

¹Department of Biology, Faculty of Arts and Sciences, Trakya University, Edirne, Türkiye

Received: 09.10.2023, Accepted: 20.12.2023, Published: 31.12.2023

ABSTRACT

This research was studied vertically in 200 m sections in different habitats of the Ganos Mountains, at altitudes from sea level to 924 m. During the research, material was collected from 31 different localities and 10 different habitats, and 23 genera and 66 species belonging to 4 subfamilies (Ponerinae, Myrmicinae, Dolichoderinae, Formicinae) were identified. Of the 66 species identified, 3 (*Aphaenogaster ovaticeps*, *Messor minor*, *Carebara oertzeni*) are new records for the Turkish fauna, and 3 species [*Messor ebeninus* Santschi, 1927, *Tapinoma simrothi* Krausse, 1911, *Proformica striaticeps* (Forel, 1911)] are new records for the Thrace Region. In vertical studies conducted on the southern and northern slopes of the Ganos Mountains, the number of species was found to be low at altitudes between 0-200 m (24 species), reaching the highest numerical value between 200-800 m (47 species), and at altitudes from 800 m to the summit the number of species decreased again (26 species).

Keywords: Ganos Mountains; Hymenoptera; Vertical distribution; Formicidae

Ganos (Işık) Dağları Karıncalarının (Hymenoptera: Formicidae) Vertikal Dağılımları

ÖZ

Bu araştırma, Ganos Dağları'nın farklı habitatlarında, deniz seviyesinden 924 m'ye kadar olan yüksekliklerde 200 m'lik kesitler halinde vertikal olarak çalışılmıştır. Araştırma sırasında 31 farklı lokalite ve 10 farklı habitattan materyal toplanmış olup 4 altfamilya (Ponerinae, Myrmicinae, Dolichoderinae, Formicinae)'ya ait 23 cins ve 66 tür tespit edilmiştir. Tespit edilen 66 türden 3'ü (*Aphaenogaster ovaticeps*, *Messor minor*, *Carebara oertzeni*) Türkiye faunası için, 3 tür [*Messor ebeninus* Santschi, 1927, *Tapinoma simrothi* Krausse, 1911, *Proformica striaticeps* (Forel, 1911)] ise Trakya Bölgesi için yeni kayıtlardır. Ganos Dağları'nın güney ve kuzey yamaçlarında yürütülen vertikal çalışmalarda 0-200 m arasındaki yükseltilerde tür sayısının düşük olduğu (24 tür), 200-800 m arasında en yüksek sayısal değere ulaştığı (47 tür), 800 m'den zirveye kadar olan yükseltilerde ise tür sayısının tekrar azaldığı (26 tür) tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ganos Dağları; Hymenoptera; Vertikal dağılım; Formicidae

1. INTRODUCTION

Since the Thrace Region is located in the area where the Mediterranean, European-Siberian and Irano-Turanian floristic regions meet, its natural vegetation shows very different characters. This region has a rich potential in terms of natural vegetation due to differences in climate, topography and geological structure [1]. Ganos Mountains, one of the important natural areas of the Thrace Region, are very important for the region with their biodiversity. Although it falls into the region where Balkan, Central European and auxin elements are dominant in terms of flora, there are maquis and pseudomaquis elements on the foothills of the mountain overlooking the Marmara Sea.

Regional studies on species diversity and vertical distribution of ants started in our country in the 1970s [2]. The species identified in these studies were evaluated in terms of taxonomic, faunistic and biogeographical aspects, and it was observed that there was a decrease in the number of ant species depending on altitude. In our country, vertical studies following Aktaş [2] and aiming to explain the distribution of ants depending on altitude are still quite limited. Examples of these studies are Aktaş [3]'s "Vertical Distributions of Ants in the Eastern Anatolia Region", Kıran and Aktaş [4]'s "Vertical Distributions of Samanlı Mountains Ants", Karaman and Aktaş [4]'s "Vertical Distributions of Kaz Mountains Ants". " can be given as an example. To date, no study has been conducted on the vertical distribution of ants in Turkish Thrace, except for the "Research on the Forest Ant Fauna of the Thrace Region" study, which includes the Istranca Mountains of Çamlitepe and Aktaş [5].

As a result of this research, it will be possible to compare the vertical data obtained in the moderately high Ganos Mountains in Turkish Thrace, which has a rich species diversity, with the data in both Anatolia and Europe. In addition, the data to be obtained will be of particular importance in terms of determining the geographical elements represented by the species. By comparing the compositions of the detected species in various habitats, determining the altitudes where ant species that prefer different altitudes can encounter and coexist, it will be determined which altitude is the most suitable transition zone. In the research, the species with the highest and lowest ecological valence will be determined. The research will also identify possible new species for the scientific world and new records for Turkey, contributing to our country's ant fauna and biodiversity.

2. MATERIAL AND METHOD

The research material was collected by working vertically in different habitats in the sub-regions of the Ganos Mountains (moist forests area on the Ganos Mountains, Güzelköy-Işıklar section, Ganos Mountains dry forests area, Maki and Pseudomaki area) within the borders of Tekirdağ province. Vertical studies were carried out from sea level to the top of the Ganos Mountains and were studied in 200 m sections. In collecting

the material, the periods when the ants were active were taken into consideration and field studies were carried out between April and October. Nests were used as the basis for collecting materials. In cases where nests could not be identified, individual samples were collected from outside the nest. Smaller specimens were caught with the help of an infiltrator, and larger ones were caught by hand. The collected material was placed in glass tubes containing 70% alcohol in the field. Samples from the castes (female, male, worker, soldier) in the nests identified on land rotation were attached to pointed triangular labels with a special water-soluble adhesive and pinned to dry material, allowing them to be examined from all angles in order to be identified and kept as museum material. The remaining samples were turned into stock material in tubes containing a mixture of 70% alcohol + glycerin (100cc 70% alcohol + 20cc glycerin).

In determining the species, resources covering research on Turkish ants and faunistic studies conducted in countries geographically adjacent to Turkey were used. In addition, Aktaç's collection of ants from Turkey and neighboring countries was used as comparison material.

The research area is shown on the map to indicate the distribution of the species (Figures 1, 2.), and the researched localities, their altitudes, research dates and habitats are presented in tables (Table 1); The identified species and the zoogeographic elements they represent are listed (Table 5, Figure 4). Additionally, the distribution of species according to habitats is shown in Table 4.

Research material is kept in the Department of Biology, Faculty of Science, Trakya University.



Figure 1: Location of the research area within the Thrace Region.



Figure 2: Localities investigated in the Ganos Mountains
(The number on the figure refer to the sequence numbers of the localities shown in Table 1)

Table 1: Researched localities, altitudes, dates and habitats.

Loc No	Locality	Altitude	Date	Habitat
1	Ormanlı Village	225-265 m.	21.06.2013	Mixed Forest (Hairy Oak, Hornbeam)
2	Ormanlı Village Ridges	340-365 m.	21.06.2013	Dense Hornbeam Forest
3	Ormanlı Village Ridges	650-675 m.	02.07.2013	Mixed Forest (Horbeam, Linden, Oak)
4	Ormanlı Village Ridges	714 m.	02.07.2013	Oak Forest
5	Ormanlı Village Ridges (summit)	924 m.	02.07.2013	Young Oak forest
6	Beyoğlu Village	250-340 m.	18.07.2013	sycamore
7	Sırtbey Village	200 m.	18.07.2013	Anthropogenic Steppe
8	Tatarlı Village	300 m.	11.09.2013	Mixed Forest (Oak, Hornbeam)
9	Yeniköy-Işıklar Village	536 m.	11.09.2013	Young Oak Forest
10	Between Bulgur Village/ Palamut Village	450 m.	16.09.2013	Young Oak Forest
11	Between Bulgur Village/ Palamut Village	572 m.	16.09.2013	Roadside
12	Hoşköy	214-230 m.	24.04.2014	Olive Grove and Bushes
13	Güzelköy	400-425 m.	24.04.2014	Roadside
14	Güzelköy	652-725 m.	24.04.2014	Mixed Forest (Young Oak-Horbeam)
15	Gaziköy	200-235 m.	25.04.2014	Sparse Plane Tree
16	Mursallı Village	225-375 m.	25.04.2014	Mixed Forest (Oak - Hornbeam)
17	Gaziköy	900-915 m.	26.04.2014	Stony Area
18	Uçmaktdere	625-680 m.	26.04.2014	Young Hornbeam Forest
19	Uçmaktdere	380-420 m.	26.04.2014	Mixed Forest (Oak, Hornbeam)
20	Uçmaktdere	200-230 m.	26.04.2014	Sparse Shrubs and Stony
21	Yeniköy	200-600 m.	27.04.2014	Stony Area
22	Bulgur-Palamut ridges	625 m.	17.06.2014	Mixed Forest, Coppice
23	Bulgur-Palamut ridges	917 m.	17.06.2014	Oak forest
24	Dağ Yenicesi (Kartaltepe)	870 m.	18.06.2014	Oak forest
25	Dağ Yenicesi (Kartaltepe)	600 m.	18.06.2014	Linden bowl
26	Gölcük Village	154 m.	19.06.2014	Plane trees, oak trees
27	Mursallı Village	400 m.	01.10.2014	Oak trees
28	Yayaköy	400 m.	01.10.2014	Plane trees, oak trees
29	Yörgüç Village	410 m.	01.10.2014	Plane trees
30	Beyoğlu Village	410 m.	02.10.2014	Mixed Forest (Plane, Oak, Linden)
31	Beyoğlu Village	600 m.	02.10.2014	Mixed Forest (Horbeam, Oak)

3. RESULT AND DISCUSSION

Within the scope of this research, the heights of the Ganos (Işıklar) Mountains from sea level to 924 m were studied vertically. The research was carried out in 31 localities and 10 different habitats among these altitudes, and as a result of the research, 23 genera from 4 subfamilies (Ponerinae, Myrmicinae, Dolichoderinae, Formicinae) and 66 species belonging to these genera were identified (Figure 3, Table 3.). Of the species identified, 31 belong to the Myrmicinae and 30 to the Formicinae subfamilies. These two subfamilies are the subfamilies with the widest distribution and the most species in Turkey. From the other two subfamilies, 3 species in Dolichoderinae and 2 species in Ponerinae were recorded. These two subfamilies are by few species throughout Türkiye [8].

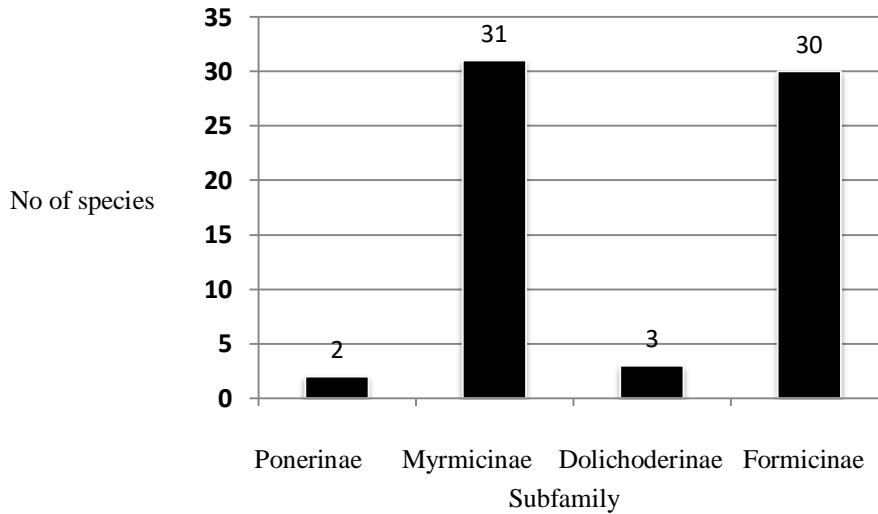


Figure 3: Distribution of ant species detected in the Ganos Mountains into subfamilies.

Three of the identified species (*Aphaenogaster ovaticeps*, *Messor minor*, *Carebara oertzeni*) are new records for the Turkish fauna. Additionally, 3 species (*M. ebeninus*, *Tapinoma simrothi*, *Proformica striaticeps*) were recorded for the first time from Turkish Thrace, indicating their locality. Considering the general geographical distribution of new records for the Turkish fauna, it is an expected result that they are found in our research area. Records of *M. ebeninus*, one of the species listed without locality in Turkish Thrace, are available from Agosti & Collingwood [9] and Radchenko [10]; The record for *P. striaticeps* belongs to Collingwood & Heatwole [11], and the record for *Tapinoma simrothi* as "Minor Asia" belongs to Collingwood [12]. In later studies, *M. ebeninus* was known from Greece [13], *P. striaticeps* from Bulgaria [14] and Greece [13]. According to the distribution of *T. simrothi* in "Asia Minor", their presence in Turkish Thrace has been confirmed.

The richest genera in terms of number of species in the region are; They are *Camponotus* (8 species), *Lasius* (8 species), *Tetramorium* (7 species) and *Messor* (7 species). This situation is consistent with the distribution throughout Thrace [15]. The genera and species represented by a single species are *Ponera coarctata* Emery, 1898, *Hypoponera eduardi* (Forel, 1894), *Cardiocondyla elegans* Emery, 1869, *Pheidole pallidula* (Nylander, 1849), *Solenopsis fugax* (Latreille, 1798), *Carebara oertzeni* (Forel, 1886), *Dolichoderus quadripunctatus* (Linnaeus, 1771), *Polyergus rufescens* (Latreille, 1798), *Lepisiota frauenfeldi* (Mayr, 1855), *Prenolepis nitens* (Mayr, 1853). Among the genera represented by a single species, *Ponera*, *Hypoponera*, *Carabera*, *Dolichoderus*, *Prenolepis* and *Polyergus* are known from Turkey with a single species so far [8]. The fact that other genera (*Pheidole*, *Cardiocondyla*, *Solenopsis* and *Lepisiota*) are represented by a single species can be explained by the fact that the research area is local and our study is vertical.

Considering the habitat preferences of the species detected in the research area, it was determined that the habitat containing the most species was mixed forest with 54 species. 54 of a total of 66 species (~82%) have been recorded in this habitat. This habitat is followed by oak forest with 37 species (~ 56%), and stream banks - plane trees with 30 species (~ 45%). The habitats containing the fewest species are shrub and stony areas with 9 species (~ 14%) and anthropogenic steppe with 8 species (12%) (Table 4).

The distribution of ant species in a certain habitat depends on a mosaic of various abiotic and biotic factors, and each of these factors can affect the distribution separately or together [16]. Species diversity is dominant in the mentioned habitats, first of all, a large part of the Ganos Mountains is covered with forest cover containing different types of tree communities, it contains mostly omnivorous species in terms of feeding regimes, the species have developed hunting abilities, they can feed on the nectar secreted by Homopters that are common in these areas. This can be explained by their ability to benefit from extrafloral nectar secretions in the forest area [17; 18]. The presence of few species in anthropogenic steppe and stony-shrub areas can be explained by the human impact of such habitats being turned into degraded habitats by destroying forests and opening settlements [19].

When the distribution of the species detected in the research area according to habitats was evaluated, the same species was not found in all 10 habitats studied. The most tolerant species according to habitat preferences are; *Pheidole pallidula*, *Crematogaster schmidtii*, *Tetramorium forte*, *Plagiolepis pallescens*, *P. pygmaea*, *Camponotus aethiops*, found in 8 of 10 habitats, and *Messor structor*, *Tetramorium caespitum* and *T. chefketi*, found in 7 habitats. From studies conducted globally; It is known that *Pheidole*, *Crematogaster* and *Camponotus* are defined as the most common genera, and *Messor*, *Tetramorium* and *Plagiolepis* are also common genera. The fact that *Pheidole*, *Plagiolepis* and *Tetramorium* species are small in size and exist in small colonies is an important factor in their adaptation to various debris and soil. On

the other hand, characteristics of *Messor* and *Camponotus* species such as being large in size, containing a large number of individuals in their colonies, being aggressive, and having a territorial area can be explained as reasons for their tolerance [20]. The species found only in one habitat are *Ponera coarctata*, *Myrmica scabrinodis*, *Aphaenogaster balcanica*, *A. ovaticeps*, *A. simonelli*, *Aphaenogaster subterraneoides*, *Messor structor aegeus*, *Cardiocondyla elegans*, *Crematogaster ionia*, *Carabera oertzeni*, *Dolichoderus quadripunctatus*, *Proformica kobachidzei*, *Camponotus truncatus*, *Lasius fuliginosus*, *L. myops*, *Formica sanguinea*, *Polyergus rufescens* species. Of these species, *P. coarctata*, *D. quadripunctatus*, *Camponotus truncatus* are species with special habitat preferences. It is completely coincidental that other species are found in only one habitat. It is possible that they can be found in more than one habitat in more intensive quantitative studies. Apart from these numerical limits, being found in numerically different habitats can also be explained by the ability of species to adapt to different ecological conditions [21].

It is seen that the research region is represented by: Holarctic, Palearctic, Western Palearctic, European Siberia, Turan-Mediterranean-Europe, Europe-Caucasus, Europe, Mediterranean, Eastern Mediterranean, Balkan, Balkan-Anatolia, Anatolia - Caucasus and Anatolia. The majority of the fauna consists of Mediterranean elements (30 species), Palearctic elements (14 species) and Endemic elements (9 species). Other elements are represented by 1-8 species (Table 5., Figure 4). This situation is also compatible with the findings of Lapeva-Gjonova and Kiran [22] in the Istranca Mountains and [23] in the Kaz Mountains. The dominance of the Mediterranean climate in the region has caused most of the species to consist of the Mediterranean species complex. On the other hand, the paleoecological history and other local features of the region also affected this distribution and played an important role in the remarkable formation of endemism.

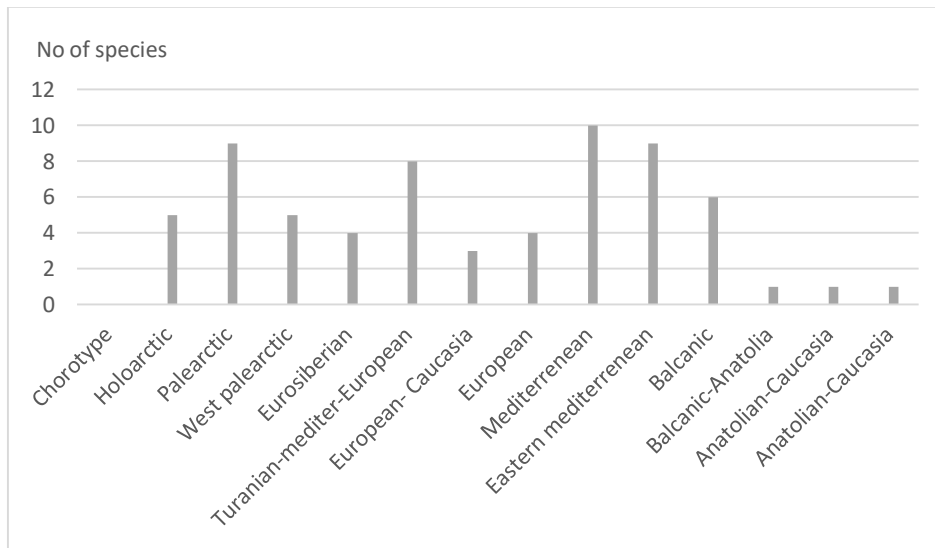


Figure 4: Distribution of species according to their chorotypes

Vertical studies in the region were carried out from both the south and north of the Ganos Mountains, from sea level to the top of the mountain (924 m). When the data obtained at every 200 m are evaluated, it is seen that the number of species is low at 0-200 m (24 species, 36.36%), peaks between 200-800 m (~ 47 species, 71.21%), and decreased again at 800 m. (26 species, 39.39%, Table 2.). This situation is parallel to the results of vertical distribution studies conducted with ants [3, 23, 6, 4, 24, 25] both in our country and in other countries.

Table 2: Distribution of species detected in Ganos Mountains according to altitude

Altitude	No of species	Percentage (%)
0-200	24	36.36
200-400	49	74.24
400-600	48	74.72
600-800	45	68.18
800 -924	26	39.39

Our research region shows anthropogenic steppe and occasionally maquis and pseudomaquis characteristics at altitudes up to 200 m. It is seen that at altitudes up to 200-800 m, the mixed forest feature of deciduous trees is dominant, and at altitudes above 800 m, there are occasional mountain meadows, shrubs and rocky areas. In other words, Ganos Mountains has 3 different vegetation zones. The small number of species found at altitudes up to 0-200 m may be associated with habitat degradation such as the conversion of formerly forested habitats at this altitude into anthropogenic steppes and opening them up to settlement and industry [19]. The altitudes of 200-800m, where the number of species is highest, are mixed forest areas dominated by deciduous trees. The high habitat productivity in these elevations and this vegetation structure [26, 27] and the variability of food resources [28] can be explained by the presence of logs and logs from trees abandoned to rot as nesting places, and the abundance of crumbs that we can define as trash [29]. The decrease in the number of species in the areas from 800 m up to the summit is possible due to the fact that forest areas are sometimes replaced by stony areas, the food sources of omnivorous species decrease and omnivorous species are replaced by carnivorous species.

When the ant fauna of the Ganos Mountains is evaluated as a whole, the 66 species that can be identified constitute a remarkable 40.49% of the 163 taxa recorded in Turkish Thrace to date. In addition, our research contributed to our country's ant biodiversity with the 3 species recorded for the first time in Turkey.

Table 3: Species found in Ganos Mountains.

Subfamily: PONERINAE LEPELETIER

Hypoponera eduardi (Forel, 1894)

Ponera coarctata (Latreille, 1802)

Subfamily: MYRMICINAE (LEPELETIER)

Myrmica scabrinodis Nylander, 1846

Myrmica ruginodis Nylander, 1846

Aphaenogaster balcanica (Emery, 1898)

Aphaenogaster ovaticeps (Emery, 1898) **

Aphaenogaster simonelli Emery, 1894

Aphaenogaster subterranea (Latreille, 1798)

Aphaenogaster subterraneoides Emery, 1881

Messor caducus (Victor, 1839)

Messor ebeninus (Santschi, 1927)*

Messor meridionalis (Andre, 1883)

Messor minor (Andre, 1883)**

Messor oertzeni Forel, 1910

Messor structor (Latreille, 1798)

Messor structor subsp. *aegeus* Santschi, 1926

Pheidole pallidula (Nylander, 1849)

Cardiocondyla elegans Emery, 1869

Crematogaster ionia Forel, 1911

Crematogaster schmidti (Mayr, 1853)

Crematogaster sordidula (Nylander, 1849)

Solenopsis fugax (Latreille, 1798)

Temnothorax parvulus (Schenck, 1852)

Temnothorax recedens (Nylander, 1856)

Temnothorax unifaciatus (Latreille, 1798)

Tetramorium caespitum (Linnaeus, 1758)

Tetramorium chejketi Forel, 1911

Tetramorium ferox Ruzsky, 1903

Tetramorium forte Forel, 1904

Tetramorium hippocratis Agosti & Collingwood, 1987

Tetramorium lucidulum Emery, 1909

Tetramorium semilaeve Andre, 1883

Carebara oertzeni (Forel, 1886)**

Subfamily: DOLICHODERINAE FOREL

Dolichoderus quadripunctatus (Linnaeus, 1771)

Tapinoma erraticum (Latreille, 1798)

Tapinoma simrothi Krausse, 1911*

Subfamily: FORMICINAE WHEELER

Plagiolepis pallescens Forel, 1889

Plagiolepis pygmaea (Latreille, 1798)

Plagiolepis taurica Lomnicki, 1925

Lepisiota frauenfeldi (Mayr, 1855)

Proformica kobachidzei Arnoldi, 1968

Proformica striaticeps Forel, 1911 *

Camponotus (Tanaemyrmex) aethiops (Latreille, 1798)

Camponotus (Myrmentoma) dalmaticus (Nylander, 1849)

Camponotus (Myrmentoma) gestroi Emery, 1878

Camponotus (Myrmentoma) lateralis (Olivier, 1792)

- Camponotus (Myrmentoma) piceus* (Leach, 1825)
Camponotus (Tanaemyrmex) samius Forel, 1889
Camponotus (Tanaemyrmex) sanctus Forel, 1904
Camponotus (Colobopsis) truncatus (Spinola, 1808)
Prenolepis nitens (Mayr, 1853)
Lasius (Lasius) alienus (Foerster, 1850)
Lasius (Cautolasius) flavus (Fabricius, 1782)
Lasius (Dendrolasius) fuliginosus (Latreille, 1798)
Lasius (Chtonolasius) meridionalis (Bondroit, 1920)
Lasius (Cautolasius) myops Forel, 1894
Lasius (Lasius) neglectus Van Loon, Boomsma & Andrasfalvy, 1990
Lasius (Lasius) paralienus Seifert, 1992
Lasius (Chtonolasius) umbratus (Nylander, 1846)
Formica cunicularia Latreille, 1758
Formica fusca Linnaeus, 1758
Formica sanguinea Latreille, 1798
Polyergus rufescens (Latreille, 1798)
Cataglyphis aenescens (Nylander, 1849)
Cataglyphis nodus (Brulle, 1833)
Cataglyphis viaticoides (Andre, 1881)
**** New records for Turkey**
*** New records for Turkish Thrace**

Table 4: Distribution of species obtained from Ganos Mountains according to habitats

Species	Habitat										No of habitats where each species is found
	Anthropogenic steppe	Shrub-Stony	Streamside and Plane Tree	Gürgen Orman	Linden trees	Mixed forest	Oak forest	Stony	Roadside	Olive Grove-Shrub	
<i>Hypoponera eduardi</i>			•			•					2
<i>Ponera coarctata</i>						•					1
<i>Myrmica ruginodis</i>				•		•	•			•	4
<i>Myrmica scabrinodis</i>						•					1
<i>Aphaenogaster balcanica</i>										•	1
<i>Aphaenogaster ovaticeps</i>						•					1
<i>Aphaenogaster simonellii</i>		•									1
<i>Aphaenogaster subterranea</i>				•	•	•	•	•			5
<i>Aphaenogaster subterraneoides</i>						•					1
<i>Messor caducus</i>						•		•			2
<i>Messor ebeninus</i>				•		•					2
<i>Messor meridionalis</i>			•	•		•	•		•		5
<i>Messor minör</i>			•	•		•			•	•	5
<i>Messor oertzeni</i>			•	•		•	•		•		5
<i>Messor structor</i>	•		•	•		•	•	•	•		7
<i>Messor structor aegeaus</i>			•								1
<i>Pheidole pallidula</i>		•	•	•		•	•	•	•	•	8
<i>Cardiocondyla elegans</i>		•									1
<i>Crematogaster ionia</i>			•								1
<i>Crematogaster schmidtii</i>		•	•	•	•	•	•		•	•	8
<i>Crematogaster sordidula</i>						•	•				2
<i>Solenopsis fugax</i>					•	•	•				3
<i>Temnothorax parvulus</i>						•	•				2
<i>Temnothorax recedens</i>						•			•		2
<i>Temnothorax unifasciatus</i>						•	•				2
<i>Tetramorium caespitum</i>		•	•	•	•	•	•	•			7
<i>Tetramorium chefketi</i>			•	•	•	•	•	•	•		7
<i>Tetramorium ferox</i>			•	•	•	•	•		•		6
<i>Tetramorium forte</i>			•	•	•	•	•	•	•	•	8
<i>Tetramorium hippocratis</i>						•	•	•		•	4

<i>Tetramorium lucidulum</i>			•	•		•		•			4
<i>Tetramorium semilaeve</i>						•	•	•			3
<i>Carebara oertzeni</i>						•					1
<i>Dolichoderus quadripunctatus</i>					•						1
<i>Tapinoma erraticum</i>			•	•		•	•	•			5
<i>Tapinoma simrothi</i>			•				•				2
<i>Plagiolepis pallescens</i>		•	•	•		•	•	•	•	•	8
<i>Plagiolepis pygmaea</i>	•		•	•		•	•	•	•	•	8
<i>Plagiolepis taurica</i>			•			•					2
<i>Lepisiota frauenfeldi</i>			•	•		•	•	•	•		6
<i>Proformica kobachidzei</i>	•										1
<i>Proformica striaticeps</i>	•		•			•					3
<i>Camponotus aethiops</i>	•		•	•	•	•	•	•		•	8
<i>Camponotus dalmaticus</i>					•	•					2
<i>Camponotus gestroi</i>	•					•					2
<i>Camponotus lateralis</i>					•	•	•		•		4
<i>Camponotus piceus</i>		•				•	•			•	4
<i>Camponotus samius</i>				•		•					2
<i>Camponotus sanctus</i>			•			•	•		•		4
<i>Camponotus truncatus</i>										•	1
<i>Prenolepis nitens</i>		•				•		•		•	4
<i>Lasius alienus</i>		•	•	•		•	•			•	6
<i>Lasius flavus</i>						•	•				2
<i>Lasius fuliginosus</i>						•					1
<i>Lasius meridionalis</i>						•	•				2
<i>Lasius myops</i>							•				1
<i>Lasius neglectus</i>	•		•			•	•				4
<i>Lasius paralienus</i>			•			•	•			•	4
<i>Lasius umbratus</i>			•		•	•	•		•		5
<i>Formica cunicularia</i>			•			•	•	•		•	5
<i>Formica fusca</i>					•	•					2
<i>Formica sanguinea</i>					•						1
<i>Polyergus rufescens</i>							•				1
<i>Cataglyphis aenescens</i>	•		•			•					3
<i>Cataglyphis nodus</i>			•	•	•	•	•		•		6
<i>Cataglyphis viaticoides</i>						•	•		•		3
Total number of species for each habitat	8	9	30	22	15	54	37	17	18	16	

Table 5: List of ant species representing different chorotypes in the Ganos Mountains

Holarctic

Tetramorium caespitum
Solenopsis fugax
Lasius flavus
Lasius myops
Lasius alienus

Palaearctic

Tetramorium forte
Carabera oertzeni
Plagiolepis pallescens
Plagiolepis taurica
Lasius fuliginosus
Lasius umbratus
Lasius meridionalis
Formica fusca
Formica sanguinea

West palaearctic

Ponera coarctata
Aphaenogaster subterranea
Tetramorium ferox
Tapinoma erraticum
Formica cunicularia

European-Siberian

Myrmica scabrinodis
Myrmica ruginodis
Temnothorax recedens
Dolichoderus quadripunctatus

Turanian-Mediterranean-European

Cremastogaster schmidtii
Camponotus aethiops
Camponotus gestroi
Camponotus lateralis
Camponotus truncatus
Camponotus piceus
Camponotus dalmaticus
Cataglyphis aenescens

European-Caucasia

Temnothorax parvulus
Temnothorax unifasciatus
Proformica striaticeps

European

Plagiolepis pygmaea
Lasius neglectus
Lasius paralienus
Polyergus rufescens

Mediterranean

Hypoponera eduardi
Messor structor
Messor minor
Crematogaster sordidula
Pheidole pallidula
Tetramorium semilaeve
Cardiocondyla elegans
Lepisiota frauenfeldi
Prenolepis nitens
Camponotus sanctus

Eastern Mediterranean

Aphenogaster ovaticeps
Messor caducus
Messor ebeninus
Crematogaster ionia
Tetramorium chefketi
Tetramorium lucidulum
Tapinoma simrothi
Cataglyphis nodus
Cataglyphis viaticoides

Balcanic

Aphaenogaster simonellii
Aphaenogaster balcanica
Aphaenogaster subterranoidea
Messor meridionalis
Messor structor aegeus
Messor oertzeni

Balcanic-Anatolian

Camponotus samius

Anatolian-Caucasia

Proformica kobachidzei

Anatolian

Tetramorium hippocratis

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

There is no conflict of interest among the authors.

CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

Author Contributions: Concept: N.A., E.Z., Y.C. Design: N.A., Y.C., E.Z., Execution: E.Z., N.A., Y.C., Material supplying: E.Z., N.A., Y.C., Data acquisition: E.Z., N.A., Y.C., Data analysis/interpretation: E.Z., N.A., Y.C., Writing: Y.C., E.Z., N.A., Critical review: N.A., Y.C., E.Z.

REFERENCES

- [1] A. Korkut, *Trakya Bölgesi Doğal Bitki Örtüsünde Peyzaj Planlama Çalışmaları Yönünden Değerlendirilebilecek Bazı Bitkisel Materyalin Saptanması*. TÜBİTAK, Tarım ve Ormancılık Araştırma Grubu Proje No: TOAG-581, Tekirdağ, (1987).
- [2] N. Aktaş, *Studies on the Myrmecofauna of Turkey. I. Ants of Siirt, Bodrum and Trabzon*. (Doktora tezi). İst. Üniv. Fen Fak. Mec. Seri B, 41(1-4), 115-135, (1976).
- [3] N. Aktaş, *Doğu Anadolu Bölgesi karıncalarının vertikal dağılımları*. IX. Ulusal Biy. Kong. Zooloji, Hidrobiyoloji Sektörünü Poster ve Bildirileri. Cilt: 2, 201-211, 21-23 Eylül, Sivas, (1988).
- [4] K. Kıran, N. Aktaş, *The Vertical Distribution of the Ant Fauna (Hymenoptera: Formicidae) of the Samanlı Mountains, Turkey*. Linzer Biol. 38(2): 1105-1122, (2006).
- [5] C. Karaman, N. Aktaş, *Ants of the genus Camponotus Mayr, 1862 (Hymenoptera: Formicidae) in the Kaz Mountains, Turkey, with descriptions of sexuals of Camponotus candiotes Emery, 1894 and Camponotus ionius Emery, 1920*. Turk J. Zool., 35(2): 183-197, (2012).
- [6] Y. Çamlıtepe, N. Aktaş, *Trakya Bölgesi Orman Karınca Faunası Üzerinde Araştırmalar*. Türkiye I. Entomoloji Kongresi Bildirileri. Entomoloji Derneği Yayınları. No.3, 685 – 694, 13-16 Ekim 1987, İzmir.
- [7] <http://googleearth>.
- [8] K. Kıran & C. Karaman, *Edirne İli Ev Karıncaları (Hymenoptera: Formicidae)*, In: Proceeding of 21st National Congress of Biology. Ege Üniversitesi, İzmir, Turkey. p. 866–867, (2012).
- [9] D. Agosti & C.A. Collingwood, *A provisional list of the Balkan ants (Hym. Formicidae) and a key to the worker caste. I. Synonymic list*. Mitteilungen der Schweizerischen Entomologischen Gesellschaft, 60, 51–62, (1987b).
- [10] A. Radchenko, *Fauna Europaea: Formicidae*. In Noyes, J. (ed.): *Fauna Europea: Hymenoptera: Apocrita version 1.3*. Available from <http://www.faunaeur.org>, (2007).
- [11] C.A. Collingwood & H. Heatwole, *Ants from Northwestern China (Hymenoptera, Formicidae)*. Psyche, 103, 1–24, (2000).
- [12] C.A. Collingwood, *The 3rd Danish Expedition to Central Asia. Zoological Results 27. Formicidae (Insecta) from Afghanistan*. Videnskabelige Meddelelser fra Dansk Naturhistorisk Forening, 123, 51–79, (1961).
- [13] A. Legakıs, *Annotated List of the Ants (Hymenoptera: Formicidae) of Greece*. Hellenic Zoological Society. No:7. 1-58, (2011).
- [14] N. Atanassov, & G.M. Dlussky, *Fauna na Bulgariya*. Aedibus Academiae Scientiarum Bulgaricae, Sofia, 310 pp., (1992).
- [15] N. Aktaş, Y. Çamlıtepe, A. Aras, K. Kıran, *Trakya Bölgesi Karıncalarının Taksonomik ve Faunistik Açından Değerlendirilmesi*. (2000).
- [16] R.K.T. Wilkie, A.L. Mertl, J.F.A. Traniello, *Species Diversity and Distribution Patterns of the Ants of Amazonian Ecuador*. PLoS ONE 5(10): e13146, (2013).
- [17] D.W. Davidson, *Species diversity and community organization in desert seed-eating ants*. – Ecology 58: 711–724, (1977).
- [18] D.W. Davidson, S.C. Cook, R.R. Snelling, T.H. Chua, *Explaining the abundance of ants in lowland tropical rainforest canopies*. Science 300: 969–972, (2003).
- [19] P. J. M. Greenslade, and P. Greenslade, *Some effects of vegetation cover and disturbance on a tropical ant fauna*. – Insectes Soc. 24: 163–182, (1977).

- [20] E.O. WILSON, *Pheidole in the New World: A dominant, hyperdiverse ant genus*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, [ix] + 794 pp.: 794pp., (2003).
- [21] N. Aktaç & A.G. Radchenko, *Türkiye karıncaları cins tanı anahtarı*. Türkiye Entomoloji Dergisi 26: 51- 61, (2002).
- [22] A. Lapeva-Gjonova & K. Kıran, *Ant fauna (Hymenoptera, Formicidae) of Strandzha (Istranca) Mountain and adjacent Black Sea coast*. North-Western Journal of Zoology, 8, 72–84, (2012).
- [23] N. Aktaç, C. Karaman, “Kaz Dağları karıncaları (Hymenoptera:Formicidae)’nın Horizontal ve Vertikal dağılımları” 21. Ulusal Biyoloji Kongresi, Uluslar arası katılımlı, Bildiri Kitabı, 203, İzmir, 3-7 Eylül 2012.
- [24] F. Glaser, *Biogeography, diversity, and vertical distribution of ants (Hymenoptera: Formicidae) in Vorarlberg, Austria*. Myrmecologische Nachrichten, 8, 263-270, (2006).
- [25] M.G. Karaman, *Zoogeography, diversity and altitudinal distribution of ants (Hymenoptera: Formicidae) in the Mediterranean and the oro-Mediterranean parts of Montenegro*. North-Western Journal of Zoology 7:26-34, (2011-06).
- [26] D.H. Janzen, *Sweep samples of tropical foliage insects: effects of seasons, vegetation types, elevation, time of day, and insularity*. – Ecology 54: 687-708, (1973).
- [27] D.H. Janzen, M. Ataroff, M. Fariñas, S. Reyes, N. Rincon, A. Soler, P. Soriano, & M. Vera, *Changes in the arthropod community along an elevational transect in the Venezuelan Andes*. – Biotropica 8: 193-203, (1976).
- [28] EARL D. MCCOY, *The Distribution of Insects along Elevational Gradients*. Oikos Vol. 58, Fasc. 3, pp. 313-322, (1990).
- [29] I. Armbrecht, I. Perfecto, J. Vandermeer, *Enigmatic biodiversity correlations: Ant diversity responds to diverse resources*. Science 304: 284–286, (2004).

Enhancing Energy Efficiency and Real-Time Monitoring in Industrial Environments Through an Integrated Software Solution: NIGHTWATCH

Kader Nikbay OYLUM¹, Kenan SELÇUK^{1*}, Turgay Tugay BİLGİN²

¹Mert Software Electronics, Bursa, Türkiye

²Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Bursa Teknik University, Bursa, Türkiye

Received: 26.10.2023, Accepted: 20.12.2023, Published: 31.12.2023

ABSTRACT

Globally, the demand for energy continues to escalate due to factors such as heating, lighting, transportation, and fuel supply for various devices. In this context, achieving energy efficiency has necessitated a comprehensive approach encompassing activities related to energy generation, transmission, and consumption. The presented study, operates within industrial settings and interfaces with energy analyzers, collecting and analyzing data such as energy consumption, instantaneous current, and voltage. This initiative seeks to provide real-time visibility into energy-related operations on factory premises. Additionally, the software's capabilities extend to retrospective data analysis, enabling informed insights for future extrapolations. Furthermore, the integration of energy consumption data from the analyzers into the Manufacturing Execution System (MES) facilitates energy tracking on a per-job basis. The software's dashboard component empowers users to establish customized threshold values for monitored energy parameters. When these thresholds are exceeded or when values deviate from expected levels, the software triggers alerts and notifications via email and other communication channels, ensuring timely dissemination of pertinent information. Consequently, the software allows businesses to establish a correlation between specific job order and machine level energy consumption data and unit costs. This correlation could foster the augmentation of efficient energy utilization, thereby enhancing competitiveness and overall efficacy.

Keywords: Real-time Data Monitoring and Visualization; Data Analytics; Energy Tracking and Analysis; Cloud Systems; Intelligent Manufacturing

Entegre Bir Yazılım Çözümü ile Endüstriyel Ortamlarda Enerji Verimliliğinin Artırılması ve Gerçek Zamanlı İzleme: NIGHTWATCH

ÖZ

Küresel olarak, ısınma, aydınlatma, ulaşım ve çeşitli cihazlar için yakıt temini gibi faktörler nedeniyle enerjiye olan talep artmaya devam etmektedir. Bu bağlamda, enerji verimliliğinin sağlanması, enerji üretimi, iletimi ve tüketimi ile ilgili faaliyetleri kapsayan kapsamlı bir yaklaşım gerektirmiştir. Sunulan çalışma, endüstriyel ortamlarda çalışmakta ve enerji analizörleri ile arayüz oluşturularak enerji tüketimi, anlık akım ve voltaj gibi verileri toplayıp analiz etmektedir. Bu girişim, fabrika tesislerinde enerjiyle ilgili operasyonlara gerçek zamanlı görünürlük sağlamayı amaçlamaktadır. Buna ek olarak, yazılımın yetenekleri geriye dönük veri analizine kadar uzanmakta ve gelecekteki tahminler için bilinçli içgörüler sağlamaktadır. Ayrıca, analizörlerden gelen enerji tüketimi verilerinin Üretim Yürütme Sistemine (MES) entegrasyonu, iş bazında enerji takibini kolaylaştırmaktadır. Yazılımın gösterge paneli bileşeni, kullanıcılara izlenen enerji parametreleri için özelleştirilmiş eşik değerleri belirleme yetkisi verir. Bu eşik değerler aşıldığında veya değerler beklenen seviyelerden saptığında, yazılım e-posta ve diğer iletişim kanalları aracılığıyla uyarıları ve bildirimleri tetikleyerek ilgili bilgilerin zamanında yayılmasını sağlar. Sonuç olarak yazılım, işletmelerin belirli iş emri ve makine düzeyinde enerji tüketim verileri ile birim maliyetler arasında bir korelasyon kurmasına olanak tanır. Bu korelasyon, verimli enerji kullanımının artırılmasını teşvik edebilir, böylece rekabet gücünü ve genel etkinliği artırabilir.

Anahtar Kelimeler: Gerçek Zamanlı Veri İzleme ve Görselleştirme; Veri Analitiği; Enerji Takibi ve Analizi; Bulut Sistemler; Akıllı Üretim

1. INTRODUCTION

The need for effective monitoring and analysis of energy consumption in industrial environments has become increasingly important. In the past, energy consumption data was often collected manually, leading to delays in accessing and analyzing the information. However, with the development of energy monitoring and analysis software platforms, businesses now can monitor their energy consumption in real-time and make informed decisions based on the collected data. This paper will demonstrate the importance of energy monitoring and analysis software in industrial environments. Real-time monitoring and analysis of energy consumption is crucial in industrial environments. It allows businesses to track and analyze their energy usage patterns, identify areas of inefficiency, and make adjustments to reduce energy consumption and costs.

One of the key features of energy monitoring and analysis software is real-time monitoring of energy consumption. This software platform collects and analyzes values such as energy consumption, instantaneous current, and voltage from energy analyzer devices used in industrial environments. The collected data is then used to monitor the factory in real-time, providing businesses with insights into their energy usage patterns at any given moment. Furthermore, the software platform allows for retrospective data analysis. This means that the collected data can be analyzed over time to make inferences for the future. For instance, businesses can identify trends in energy consumption and make predictions about future energy needs.

Another important aspect of energy monitoring and analysis software is its integration with other systems. For example, the energy consumption data collected from the energy analyzer can be integrated into the work order/production notifications in the MES system. This integration enables businesses to monitor energy consumption on a work order basis, allowing them to measure the unit costs realized for each work order. Moreover, the software platform includes a control panel or dashboard that provides alarms and notifications when user-defined threshold values for energy consumption are exceeded or lower than expected, alerting relevant personnel through channels such as email. This feature ensures that businesses can take immediate action in response to any anomalies or deviations in energy consumption, helping them optimize their energy usage and minimize costs.

One of the benefits of implementing energy monitoring and analysis software in industrial environments is the potential for increased efficiency and competitiveness [1]. By monitoring energy consumption on a work order basis, businesses can identify areas of inefficiency and take corrective actions. For example, by analyzing the relationship between work order-based energy consumption data and machine-based energy consumption, businesses can identify machines or processes that are consuming excessive [2] energy and implement measures to optimize their use. Additionally, the software platform allows for the comparison of energy consumption between different work orders or production lines [3].

This allows businesses to identify best practices and replicate them across the organization, leading to more efficient energy usage and ultimately, increased competitiveness in the market. The integration of energy monitoring and analysis software with other systems, such as the MES system, enables businesses to have a comprehensive view of their energy consumption and make informed decisions based on real-time data [4]. The energy management systems offers many benefits, such as optimizing energy consumption, reducing costs, improving the corporate image of the enterprise, and reducing the negative impact on the environment [5]. Therefore, by implementing an effective energy monitoring and analysis software platform within industrial environments, businesses can not only reduce their overall energy consumption and costs but also improve their environmental sustainability and corporate reputation. Moreover, the integration of energy consumption data into work order and production notifications allows for a more accurate measurement of unit costs. This allows companies to have a more transparent understanding of their energy expenses, enabling them to make data-driven decisions for cost optimization. In this context, monitoring and analyzing energy consumption in industrial environments can play a vital role in achieving energy savings and promoting sustainability. Alerts and notifications provided by the developed control panel further enhance the efficiency of energy management. These notifications ensure that relevant stakeholders are immediately informed when energy values exceed or fall below predefined thresholds [6]. As a result, prompt actions can be taken to address any anomalies or deviations, preventing potential energy waste or inefficiencies.

In today's rapidly changing world, the significance of accurate monitoring and analysis of energy consumption in industrial environments cannot be overstated. Energy efficiency is a crucial factor for the industrial sector, and businesses are increasingly recognizing the importance of implementing effective energy management systems [5]. These systems not only enable businesses to optimize their energy consumption and reduce costs but also improve their corporate image and minimize their negative impact on the environment.

Table 1: Feature Comparison Table.

Function and Features	Nightwatch	Webview	Enerthings
Monitoring	✓	✓	✓
Alert	✓	✓	✓
Analysis	✓	✓	✓
Multiple Communication Protocol Support	✓	X	X
Multiple Alert Channel Support	✓	X	X
Top System Integration	✓	X	X
Unit Conversion Cost Calculation	✓	X	X
Gateway Device Dependency	X	✓	✓

According to the feature comparison presented in Table 1, the Nightwatch software encompasses numerous supplementary functionalities and features in comparison to its counterparts. Thanks to its support for multiple communication protocols and alarm channels, it can be easily adapted to a large number of devices and can work in harmony with different communication channels. Noteworthy, among its attributes is the capacity to perform unit conversion cost calculations on collected data tailored to user specifications. This capability ensures the prevention of any compromise in system speed and performance without incurring additional processing overhead. Moreover, the system exhibits robust support for heightened system integrations and a facile adaptability to diverse application domains and user profiles. A distinctive advantage of the Nightwatch lies in its obviation of the necessity for supplementary gateway hardware during the data transfer phase, a requirement found in equivalent systems [7] [8]. Consequently, the system precludes incurring additional investment costs.

2. MATERIAL AND METHODS

This section outlines the methodology and components employed in this study for enabling real-time data collection from machines, analyzers, and sensors situated within production fields, along with the standardization of data transmission to upper-level modules and systems. The key concepts within the overarching architecture are as follows:

- **Data Collection:** Data retrieval is based on configurations and involves the extraction of data from data sources, notably Modbus TCP gateways. Device identification, encompassing device IP/port and unit ID/slave ID, as well as addresses and data types, plays a crucial role in data collection.
- **Device:** Refers to a physical device or gateway utilized for data retrieval. Presently, the system is configured to interface with Modbus TCP gateways, with plans to accommodate other protocols and standards in the future.
- **Unit:** A logical component residing within a device, presently identified via a Slave ID/Unit ID.
- **Reading Definition:** Signifies a data point characterized by a unique address and data type. Readings for units are defined, and numeric formulas are attached to these readings to facilitate value calculations.
- **Numeric Formulas:** These formulas offer the means to compute actual values from raw reading data. Numeric formulas support basic calculations by employing predefined and optional multipliers and divisors.
- **Alerts:** A mechanism for sending notifications to users predicated on predefined threshold values and trigger conditions. Alerts are defined in relation to a device reading, identified by its name, and the numeric formula attached to the reading definition.

- Channels: Channels are used to disseminate alerts. Presently, SMTP Mail and Telegram channels are supported.
- Sinks: Sinks are employed to disseminate reading data to message brokers, databases, third-party systems with REST endpoints, and our proprietary trexDCAS. Some sink implementations support the distribution of alerts. Sinks can be configured for integration purposes to transmit device data or alerts.
- Actor Model: Data collection and alert chart generation background services are implemented as Actor Models using the Akka.NET framework. All logic is encapsulated within actors, with services utilized by these actors. Communication between actors is achieved through messages and events.
- Plots: Device data is visualized using OxyPlot charts within our Windows Desktop application. Additionally, support is provided for embedding PNG charts within alert messages.

Figure 1 provides an overview of the system's general architecture.

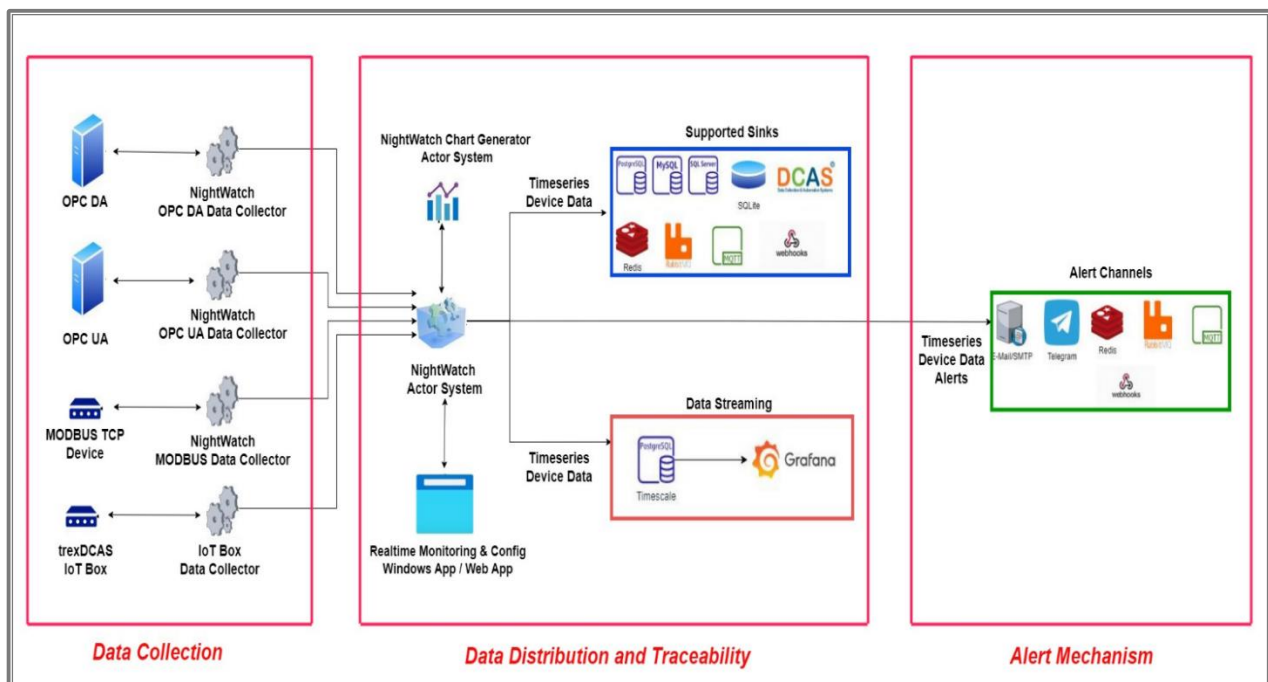


Figure 1: General System Architecture.

Nightwatch comprises three primary components, namely, data collection, data distribution and traceability, and the last one is the alert mechanism.

Nightwatch has the capability to gather data from devices supporting OPC DA, OPC UA, and Modbus communication protocols. The acquired data undergoes enrichment through various calculations and functions, transforming it into meaningful information. The system is versatile in its support for different databases, allowing for integration customization based on user preferences. Visualization of the collected

data is achieved by aligning it with the corresponding machine and work order. Notifications regarding anomaly values exceeding user-defined threshold levels can be disseminated to relevant individuals through diverse communication channels.

2.1. Data Collection

Developing industrial IoT solutions presents a primary challenge arising from the diversity of machines and sensors used in the field, resulting in difficulties in maintaining a consistent and healthy data flow. The key issues encountered in data collection and the broader challenges they pose can be summarized as follows:

- Disruption of digitization in production fields due to the presence of older machines incapable of generating data.
- Escalation of system complexity and data collection expenses owing to the diversity in machine and sensor brands, models, protocols, and data formats.
- Diminished data quality at the corporate level due to the inability to centrally perform data integration, cleansing, and enrichment processes.
- High costs and prolonged installation and project durations resulting from repetitive efforts at the organizational level. These efforts arise from the need for various systems (MES, ERP, Quality Applications, etc.) to access machine data using distinct frequencies and methods.

The developed system provides support for widely used industrial protocols, including OPC UA, OPC DA, and MODBUS TCP. Furthermore, it offers direct data retrieval capabilities from PLCs such as Siemens, Mitsubishi, Omron, Rockwell, and Allan-Bradley. In addition to these aforementioned protocols and PLCs, the system is also compatible with Mert Software & Electronics' proprietary hardware, known as the trexDCAS IoT Box.

In the Nightwatch platform, raw data collected from machines and sensors can be amalgamated, filtered, and enriched using advanced scripts that can be defined during the configuration phase. This enrichment encompasses a broad spectrum of functions, encompassing not only fundamental mathematical operations but also advanced numerical processes, signal processing, geographical location calculations, conditional expressions, and more.

2.2. Data Distribution and Traceability

The component responsible for transmitting raw or enriched data collected from various machines and sensors to upper-level modules or systems is referred to as the "data distribution" component. The system's data distribution capabilities encompass the following features:

- Definition of Target Systems: The system allows for the definition of target systems for data transmission using generalized and standardized configurations.
- Data Transmission Formats: It enables the transmission of collected and computed data to target systems in four different standard formats, regardless of the source machines and protocols, based on the intended use.
- Simultaneous Data Transmission: The system facilitates simultaneous data transmission to multiple target systems, whether they are of the same type or different types.

The fundamental concept underpinning the data distribution capabilities of the designed system is referred to as a "Sink." Sinks encompass the types of target systems to which data will be sent and the associated settings for these target systems, including addresses, usernames, passwords, and more. In essence, Sinks are the components responsible for enabling data transmission to external systems within the system.

The system utilizes integration sinks for distributing collected or generated data and alarm sinks for distributing alarm data when predefined alarm conditions are met. The platforms to which the system can distribute data using integration sinks include:

- Relational databases (PostgreSQL, Microsoft SQL Server, Oracle, MySQL, MariaDb, and SQLite)
- Message brokers supporting the MQTT protocol (e.g., Mosquitto)
- Message brokers supporting the AMQP protocol (e.g., RabbitMQ)
- Redis
- Systems supporting the OPC UA protocol (e.g., KepWare)
- Custom systems tailored to individuals or customers using the Web Hook mechanism, based on REST
- trexDCAS Energy module
- trexDCAS Operator Panel

Time-series data gathered from the sensors are stored in PostgreSQL, an open-source database management system, for further analysis. This data is subsequently transformed into real-time and historical analysis plots using Grafana [9], allowing for in-depth analysis (Figure 2).



Figure 2: Visualization of the collected data.

2.3. Alert Mechanism

The alert mechanism in this system involves real-time processing of data obtained from machines and sensors based on user-defined conditions. It also includes the capability to send alarm notifications through user-defined channels to external systems, email, or instant messaging services when specific alarm conditions are met.

The design principles for the alarm system in this developed system encompass the following aspects:

- **Ease of Alarm Definition:** Alarm conditions should be easily defined.
- **Real-time Processing:** Alarm conditions should operate in real-time on the raw data collected from machines and sensors.
- **Utilization of Calculations:** Alarm conditions should also be capable of operating on real-time calculations performed on data generated from the raw data.
- **Notification Channels:** Notifications should be sent through defined channels when alarm conditions occur.
- **Integration with External Systems:** Alarm information should be distributed to external systems via alarm sinks when alarm conditions are met.
- **Historical Data Distribution:** Historical values of the sensor data that triggered the alarm can be distributed as information and, if desired, in graphical form through channels or sinks.

The alarm detection mechanism of the system is founded on four fundamental concepts:

- Raw Data: Real-time data collected from machines or sensors, with unit conversions applied.
- Generated Data: Real-time data derived from raw data using either complex or simple calculations supported by scripts integrated into the system.
- Data Monitoring Windows: These are created by users and configured concerning time intervals.
- Alarm Condition Occurrence: Alarm conditions are defined through configuration and are used to trigger alarms.

The system generates alarms based on these four concepts to notify users of changes in status or conditions, thus offering effective real-time monitoring and alerting capabilities. When an alarm is detected, the system simultaneously dispatches alarm information and historical data, along with a graph, as a message to one or more configured channels, which can be of different types. The developed system supports channels of the Email and Telegram types, simplifying the configuration and use of alarm notifications through these user-friendly channels.

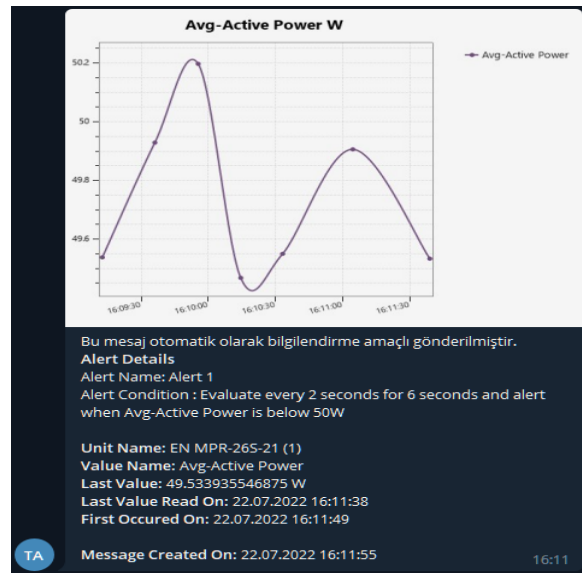


Figure 3: Alert message sent to the Telegram channel.

Figure 3 illustrates the structure and content of an alarm message sent to the Telegram channel. For channels not directly supported by the system, such as delivering notifications through messaging platforms like Slack or Microsoft Teams, the system offers the option to utilize pre-existing sinks (e.g., MQTT, RabbitMQ, Redis, etc.). These sinks allow the system to interpret alarm messages in JSON format and forward them to the preferred sink for further transmission to the desired messaging services (see Figure 4).

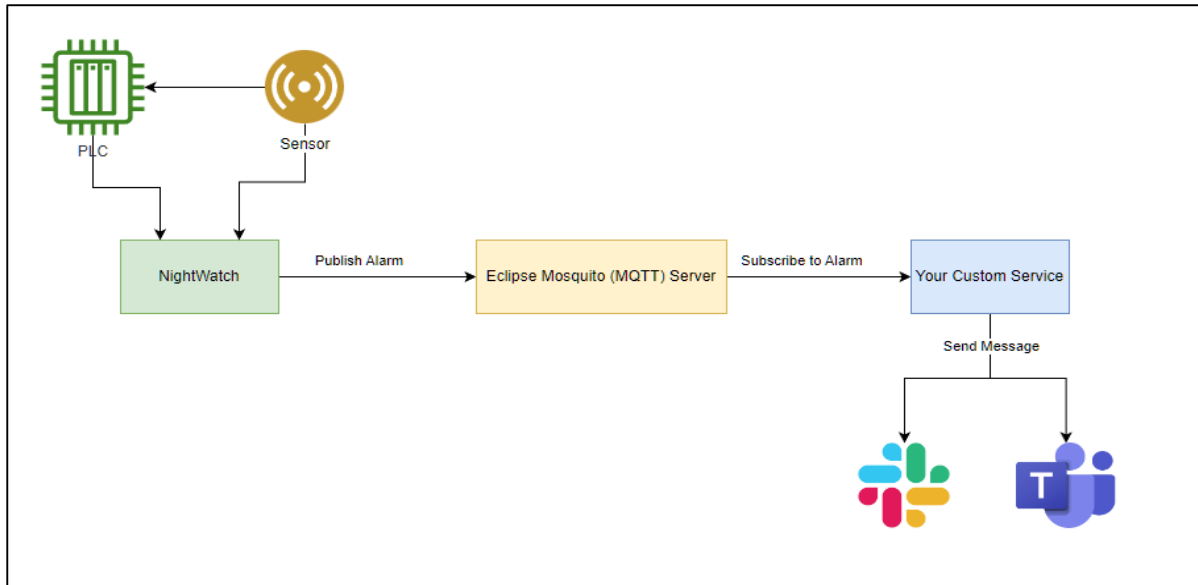


Figure 4: Sample structure for sending alert messages to Slack and Microsoft Teams.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In this article, the proposed system facilitates the recording of data related to processes that enterprises aim to monitor. Consequently, it enables businesses to measure unit costs on a work order basis and monitor the relationship between work order-based energy consumption data and machine-based energy consumption. Upon adapting and implementing the developed system in an enterprise focused on monitoring energy losses, notable results have been obtained. When comparing sample machine data for the same number of work orders over a 5-month period, using a 5-minute data collection interval, it becomes evident that energy consumption for the selected machine improved by 36% from the initial reading (71.1 Amperes) to the final reading (45.4 Amperes) due to the actions taken.

4. CONCLUSION

In today's world, where energy and natural resources are limited, monitoring critical issues such as energy, water, and pollution, and swiftly implementing potential improvements, are of paramount importance in leaving a more habitable world for future generations.

Building on this understanding, the system under discussion in the article enables the following processes:

- Energy consumption data collection and monitoring,
- Energy consumption Key Performance Indicator (KPI) calculation and monitoring,

- Process machine data collection and manual data measurement, trexDCAS production line energy consumption and anomaly detection machine data collection,
- Machine Overall Equipment Efficiency (OEE)/performance data collection.

As a result, Nightwatch software is a significant endeavor in terms of enabling businesses to monitor overlooked aspects through the system, take necessary actions, and make improvements. Our proposed energy management software architecture will make a positive contribution to an organization's energy management and savings policies.

In future studies, the goal is to develop self-learning and predictive systems through the utilization of data analytics and machine learning models derived from the collected data. This initiative is poised to significantly enhance maintenance and quality processes within production sites.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

There is no conflict of interest among the authors.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was developed in the R&D centre of Mert Yazılım Bilgisayar Elektronik Makine Sanayi Ticaret A.Ş. and supported by the Ministry of Industry and Technology with the project code KTPMY29.

CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

K.N.D.: Contributed to investigations, resources, writing-original drafting.

K.S.: Contributed to investigations, resources, writing-original drafting.

T.T.B.: Contributed to investigation, resources, writing—review and editing.

REFERENCES

- [1] Sucic, B., Peckaj, M., Tomsic, Z., & Uranic, J. (2019). Systematic approach for improving energy efficiency in industrial facilities, from energy audit to practical implementation—case study production of autoclaved aerated concrete. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 116, p. 00083). EDP Sciences.
- [2] Kang, H. S., Lee, J. Y., & Lee, D. Y. (2020). An integrated energy data analytics approach for machine tools. *IEEE Access*, 8, 56124-56140.
- [3] Wang, J., Huang, Y., Chang, Q., & Li, S. (2019). Event-driven online machine state decision for energy-efficient manufacturing system based on digital twin using max-plus algebra. *Sustainability*, 11(18), 5036.
- [4] Linan-Reyes, M., Garrido-Zafra, J., Gil-de-Castro, A., & Moreno-Munoz, A. (2021). Energy Management Expert Assistant, a New Concept. *Sensors*, 21(17), 5915.
- [5] Rajić, M. N., Maksimović, R. M., Milosavljević, P., & Pavlović, D. (2019). Energy management system application for sustainable development in wood industry enterprises. *Sustainability*, 12(1), 76.

[6] Zhang, N., Yang, N. C., & Liu, J. H. (2021). Optimal time-of-use electricity price for a microgrid system considering profit of power company and demand users. *Energies*, 14(19), 6333.

[7] Webview. [Online], Available: <https://www.socomec.co.in/en-in/p/webview> , Accessed: 27.11.2023.

[8] Enerthings. [Online], Available: <https://www.entec.com.tr/enerthing/> , Accessed: 27.11.2023.

[9] Grafana. [Online], Available: <https://grafana.com/>, Accessed: 08.30.2023.

Urban Agriculture Approach in The Development of Sustainable Cities: The Case Of Elazığ, Türkiye

Fürüzan ÇELİK¹, Yaşar MENTEŞ², Oğuz ATEŞ^{3*}

^{1,3}Department of Landscape Architecture, Faculty of Architecture, Kırklareli University, Kırklareli, Türkiye

²Ministry of Agriculture and Forestry, Elazığ Provincial Directorate of Agriculture and Forestry, Elazığ, Türkiye

Received: 19.11.2023, Accepted: 28.12.2023, Published: 31.12.2023

ABSTRACT

Urban areas are generally residential areas that are not considered important in terms of agricultural production. Since agricultural activities are not considered important in urban areas, cities with high population density, especially in metropolitan cities, are deprived of agricultural production areas. When considered from this point of view, cities come to the fore as places where food is consumed, sold and easily available. Although agricultural activities seem to be far from urban areas, the concepts of agriculture and city cannot be considered separately. One of the tools in question for ensuring sustainable urban development is urban agriculture. Urban agriculture is a phenomenon that enables communities in many regions to interact on many issues, beyond being a simple task. Within the scope of this study, the city area of Elazığ province was examined from the perspective of urban agriculture. Various suggestions are presented to ensure sustainability in Elazığ province, to develop more accurate insights into regional and urban food supply, to increase the importance of urban aesthetics, urban land use, urban environmental management, public health and economic development.

Keywords: Sustainability; Urban agriculture; Urban design; Elazığ.

Sürdürülebilir Kentlerin Gelişiminde Kentsel Tarım Yaklaşımı: Elazığ Kenti Örneği

ÖZ

Kentler denilince akla yerleşim ve sanayileşmenin yoğun olduğu, tarımın yapılmadığı ya da az yapıldığı tarım dışı alanlar gelir. Bu alanlar genelde tarımsal üretim açısından önemsiz yerleşim alanlarıdır. Kırsal alanlara nazaran kentsel alanlarda tarımsal faaliyetlere önem verilmediğinden dolayı, büyükşehirler başta olmak üzere nüfus yoğunluğu fazla olan şehirler tarımsal üretim alanlarından yoksun bırakılmıştır. Bu açıdan ele alındığında kentler tarımsal üretim alanları olmaktan çok gıdaların tüketildiği, satışa sunulduğu, uzak mesafelerden getirilmiş olmalarına rağmen kolay temin edilebilecekleri yerler olarak ön plana çıkmaktadır. Sürdürülebilir bir kentsel gelişim için söz konusu araçlardan biri de kentsel tarımdır. Kentsel tarım basit bir uğraş olmanın ötesinde yapıldığı bölgelerdeki toplulukların birçok konuda etkileşim kurmasını sağlayan bir olgudur. Bu çalışma kapsamında Elazığ ili Mücavir alanı kentsel tarım perspektifinden incelenmiş, Elazığ ilinde sürdürülebilirliği sağlamak, bölgesel ve şehirselle gıda sağlama konusunda daha doğru anlayışlar geliştirmek, kent estetiği, kentsel arazi kullanımı, kentsel çevre yönetimi, halk sağlığı ve ekonomik kalkınmanın önemini arttırmak için çeşitli öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik; Kentsel tarım; Kentsel tasarım; Elazığ.

1. INTRODUCTION

As the phenomenon of urbanization in the world increases, access to the green area decreases, people are getting further away from nature every day. The preservation of the ecological balance has been constantly ignored. It is a known fact that natural resources are limited and the bad results of rapid urbanization are irreversible.

The most important problem is that natural resources cannot be managed wisely and disappear rapidly. If countries do not deal with these global problems, there will be a shortage of raw materials and shortages worldwide [1]. Today, the concept of "sustainability" has gained importance as a vital part of the solution to the problems of environmental degradation and reduction of natural resources in the cities. The concept of sustainability, which includes an ecologically based system, is an extremely important value in city planning.

Human is at the core of the concept of sustainable development. It is stated as the basic principles that environmental protection should be made complementary to development programs in order to achieve sustainable development [2].

Alternative urban models are needed for the construction of sustainable cities. The best scenario for building more sustainable cities is to direct people's behaviour towards a more environmental friendly system. One of the most important tools for ensuring sustainable urban development is urban agriculture. Reducing the damage caused by urbanization to the environment, gaining local food consumption experiences will start with the integration of urban agriculture as part of the infrastructure systems of the society. Urban agriculture is emerging as an important tool in landscape planning and design studies to maintain ecological balance and ensure sustainability. Integration of the urban food system with the city has become an integral part of urban ecosystems. Cities have enormous potential for food production. The most reliable and sustainable way of people's food supply is to produce food needs by themselves. The most practical way to provide nutritious and affordable food for citizens is to create opportunities for production in cities.

In the Brundtland Report prepared by the World United Nations Environment and Development Commission in 1987, the contribution of urban agriculture to food production, poverty reduction, and improvement in air, water and soil quality has been emphasized [3].

Urban agriculture contributes significantly to urban sustainability. Urban agriculture is a survival strategy. However, agriculture has been seen as a rural activity and the role of agriculture in the city has been ignored by policy makers until today. The concepts of city and agriculture have recently been matched by many planners and academics. The environmental benefits of urban agriculture have just started to be accepted.

As Luc Mougeot points out, “Urban agriculture cannot be a complete solution to the problems facing the future of cities, but it can be an important part of any program to make these cities more liveable and improve the lives of their inhabitants” [4].

Within the scope of this study, the city area of Elazığ province has been examined from the perspective of urban agriculture. Various suggestions have been presented to ensure sustainability in Elazığ province, to develop more accurate insights into regional and urban food supply, to increase the importance of urban aesthetics, urban land use, urban environmental management, public health and economic development.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Material

The main material of the study is the urban area of Elazığ Province located in Turkey. Urban agriculture is not a conscious activity in Elazığ province. No studies have been conducted on the inclusion of urban agriculture in municipal development and policies. The concept of “Urban Agriculture” is not included in both national and local laws. The contribution of agriculture to the socioeconomic and ecological structure of the city is still not fully understood. Along with the increasing population growth, the increase in zoning activities further distanced urban agriculture from the city centre. Due to the high value of the land in the city, the urban agriculture has always been neglected (see Figure 1).

Factors envisaging the implementation of urban agriculture in Elazığ province can be listed as items; In terms of climate and soil properties, Elazığ Province has favorable conditions in the cultivation of many products. Elazığ city center is built on a part of the plain called “Uluova”, where there are fertile, alluvial and mostly 1. class agricultural lands.

With the construction of the Keban Dam Lake in Elazığ Province, which has terrestrial climate features, the climate became temperate and showed a transition feature between the continental climate and the Mediterranean climate. This has enabled the vegetation period to increase and the variety of crops to be grown. Suitable soil properties, favourable climatic conditions are quite suitable for urban agriculture.

Although there are many local fruit, vegetable and cereal varieties belonging to Elazığ province; With the spread of ready-made vegetable seedlings and new fruit varieties in recent years, the planting area of domestic seeds has decreased. In this period, in which local food is considered important for ensuring food safety, “urban agriculture” can be used as a means of recycling domestic seeds and varieties to the agriculture of the province.

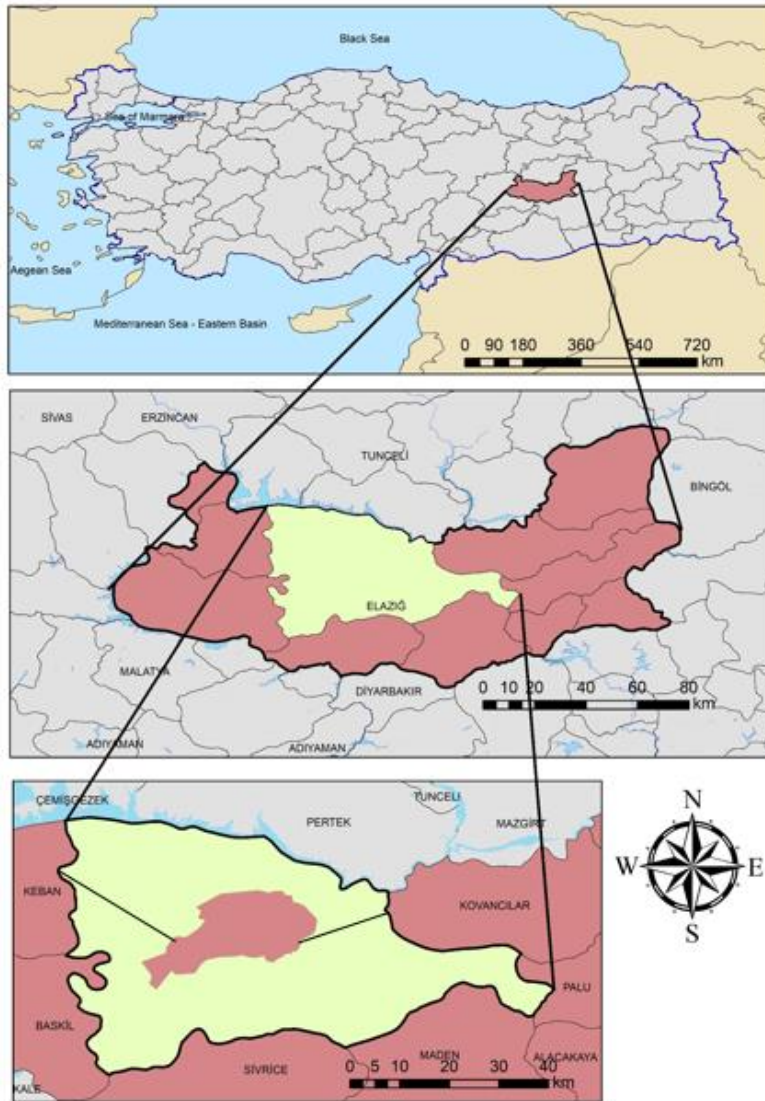


Figure 1: Elazığ location map.

Approximately 77% of the population of Elazığ Province live in urban areas and 23% live in rural areas. Although the urban population is higher than the rural population, the majority of this population migrated from the rural areas where agricultural activities are carried out to the city centre [5].

With the integration of urban agriculture to Elazığ Province, it will be easy for the public to adopt these activities and will not experience any adaptation problems. Urban agriculture can play an active role in providing additional income source for the lower income families who refugees coming from Syria, Iraq and Afghanistan and coming from the provinces of Bingöl, Tunceli and Diyarbakır for various socioeconomic reasons.

As a result of the digitization studies carried out by Şengün and Üstündağ on Elazığ city development plan, the ratio of the areas reserved for green areas to the total development plan area become 9.4%. Although the average of the city centre (9.4%) is generally acceptable, this rate is extremely high in some neighbourhoods and low in some neighbourhoods. According to the Zoning Law No. 3194, the number of green areas per person in urban areas should be 10 m². This amount is below 10 m² in 17 neighbourhoods covering 69% of the Elazığ population. The amount of green area per person is less than 3 m² in 11 neighbourhoods due to their dense population [5]. Urban agriculture can be considered as an option in increasing the number of green areas per capita.

Compared to rural agriculture, urban agriculture emerges as a lower cost and more attractive investment tool in the city for reasons such as convenience in input provision and proximity to marketing channels [5].

There is no land specially designated for urban agriculture in Elazığ city centre. Attention should be paid to the connection between the cultural, economic and environmental aspects of the city in land use applications. Many different types of activities can contribute to the city as a whole within the scope of urban agriculture in Elazığ. In order to develop a special perspective in agriculture-urban relations in the context of urbanization and to examine urban agriculture from a wider spatial perspective, the urban agriculture activities to be implemented in the city area of Elazığ province are listed below;

- Roof, balcony, terrace and wall areas
- Home gardens
- Site gardens
- Unused empty plots
- Roadsides
- Collective (Community, allocation, hobby, etc.) gardens
- Neighbourhood parks
- Institutional gardens
- Urban farms

2.2 Method

As a method, documentary and experimental research methods have been used based on qualitative and quantitative data. Within the framework of the documentary research method, national or international library, archive and internet data related to the subject have been compiled as text or picture. In the frame of experimental research method, the data collected objectively have been analysed and evaluated with the help of measuring tools such as Geographic Information Systems (GIS), observation, interview.

In this context, 1 / 100.000 scale soil maps prepared by Soil-Water General Directorate and revised by General Directorate of Rural Services have been analysed using GIS by ArcGIS software. For this purpose, land use capability (LUC) classification, great land groups (GLG) parameters have been made for productivity analysis. The productivity of the city area of Elazığ province has been revealed in terms of urban agriculture. Google Earth satellite images, population density, other cultural data obtained because of observation have been combined with these data; Urban agriculture typologies and strategies have been presented to Elazığ Province (see Figure 2).

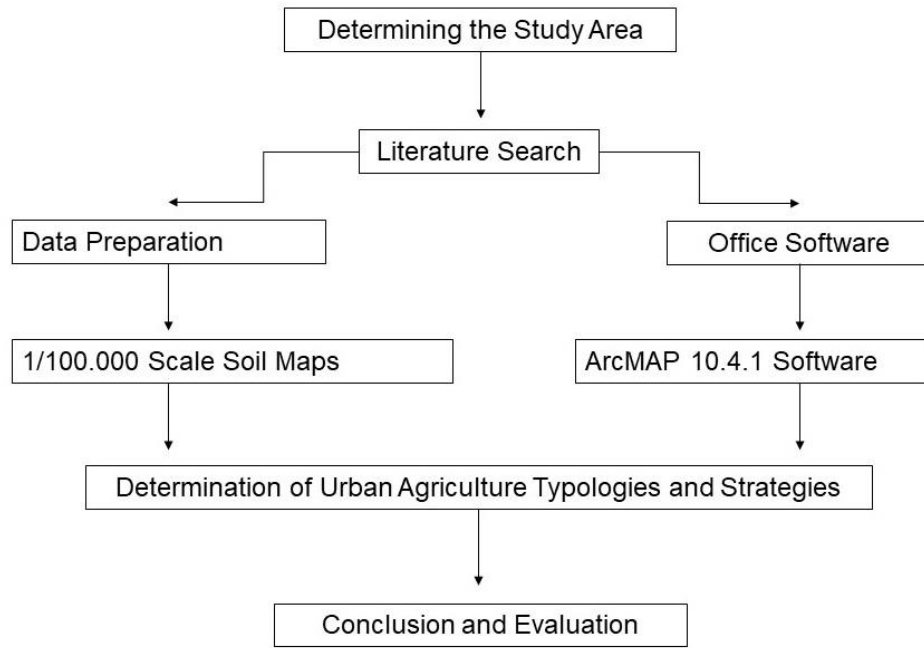


Figure 2: Method flow chart.

3. FINDINGS

3.1. Information about the study area

Elazığ is located in Turkey's Eastern Anatolia Region. The average altitude of the city is 1067 meters. Its area is 9313 km² and is surrounded by Malatya, Bingöl, Tunceli, Erzincan and Diyarbakır provinces. In terms of geographical location, it is the junction point of roads connecting the region to other regions.

In Elazığ province, continental climate is dominant. After the establishment of the Keban Dam in 1974, the climate softened. In addition to the continental climate, the Mediterranean climate is also observed in some parts of Elazığ. Temperature values range from -15 ° C to + 42 ° C [6].

According to the 2018 data of European Environment Agency Corine Land Cover Data, 31.22% of Elazığ province is agricultural areas, 1.10% artificial surfaces, 61.20% forest and seminatural areas and 6.48% covered with water bodies [7] (see Table 1).

Table 1: Corine land cover of Elazığ [7].

Land Cover Type	Amount (Hectare)	%
1. Artificial Surfaces	10206	1.10
1.1 Urban fabric	5759	0.62
1.2 Industrial, comercial and transport units	1631	0.18
1.3 Mine, dump and construction sites	2584	0.28
1.4 Artificial, non-agricultural vegetated areas	232	0.03
2. Agricultural areas	289458	31.22
2.1 Arable land	122597	13.22
2.2 Permanent crops	6641	0.72
2.3 Pastures	10545	1.14
2.4 Heterogeneous agricultural areas	149675	16.14
3. Forest and seminatural areas	567464	61.20
3.1 Forest	16130	1.74
3.2 Shrub and/or herbaceous vegetation associations	303317	32.71
3.3 Open spaces with little or no vegetation	248017	26.74
4. Wetlands	0	0
4.1 Inland wetlands	0	0
4.2 Coastal wetlands	0	0
5. Water bodies	60048	6.48
5.1 Inland waters	60048	6.48
5.2 Marine waters	0	0
TOTAL	927176	100

According to the Land Use Capability Classification (LUC), the lands in Elazığ Province have been examined in 8 classes. Accordingly, the highest spatial distribution constitutes I. class agricultural lands, the least spatial distribution constitutes VII. class agricultural lands. Looking at the LUC map, it is seen that the I. class agricultural lands are concentrated in the city centre of Elazığ [6] (see Figure 3).

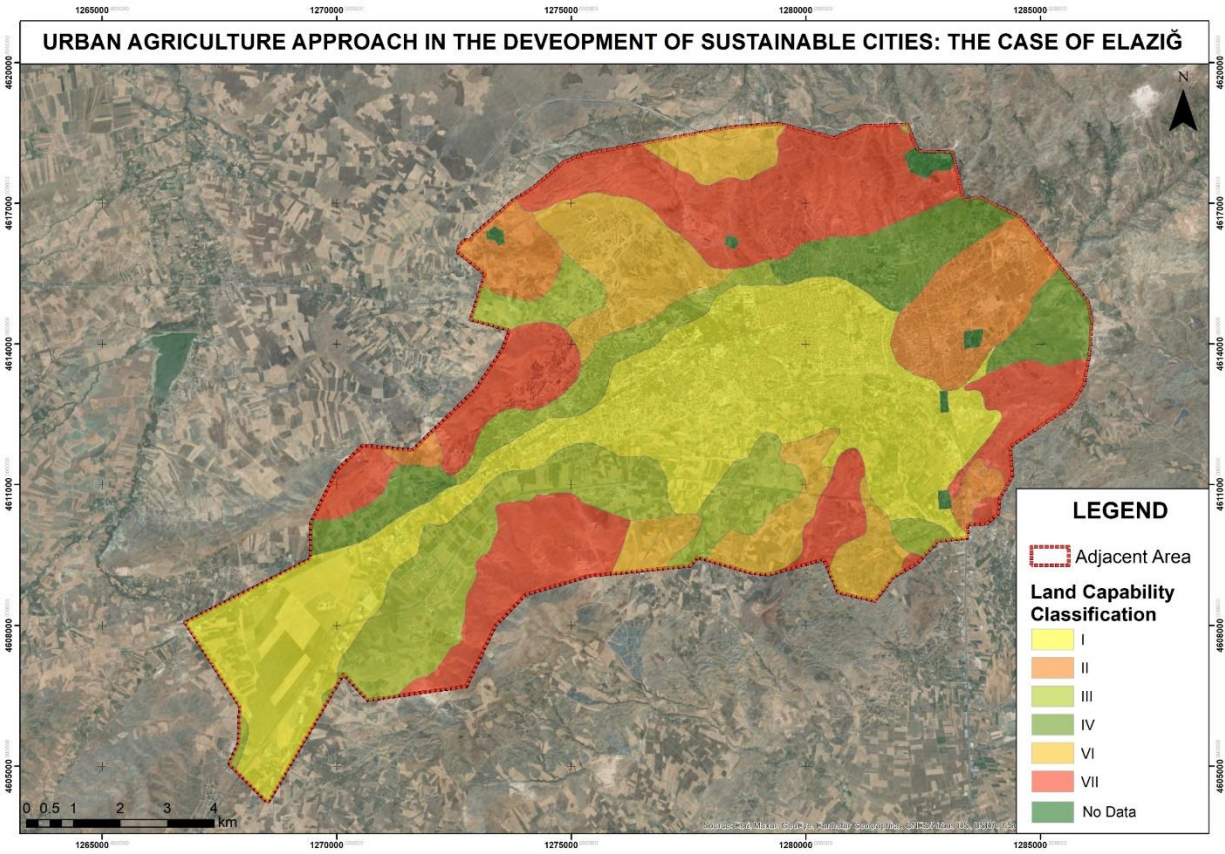


Figure 3: Elazığ province land use capability (LUC) classification [6].

Various size soil groups have been formed for reasons such as climate and topography in Elazığ. Apart from these, there are some types of land that do not have ground cover. Considering the distribution of Great Soil Groups (GSG) in Elazığ Province, the most areal distribution is brown soils (B) and the least areal distribution is basaltic soils (X). Looking at the Elazığ Province Great Soil Groups (GSG) land distribution map, it is seen that most of the alluvial soils are concentrated in Elazığ city centre [6] (See Figure 4).

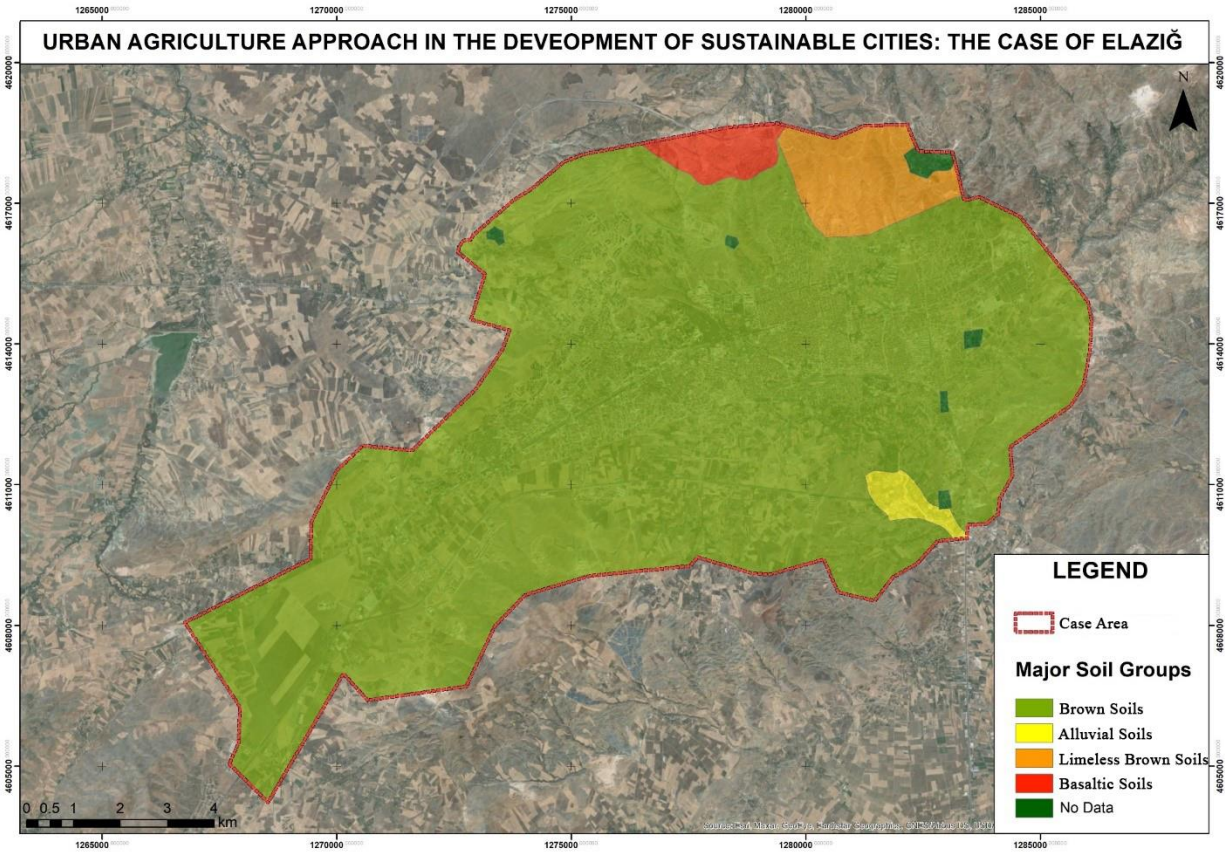


Figure 4: Elazığ province great soil groups (GSG) land distribution [6].

64 people are per square kilometre in Elazığ province, with a surface area of 9,313 km². The population density of Elazığ province is 64 / km² [8]. According to the Turkey Statistical Institute data, 77% of the province's population lives in urban areas and 23% live in rural areas. Urban population is much more than rural population. There is a continuous migration from the villages to the city centre.

Elazığ city centre was established in the most productive area of the province. Due to the insufficient amount of annual rainfall, dry agriculture system is generally performed in the province. In Elazığ province, large agricultural farms are outside the city. Vegetable production in the city is mostly done in the form of small family businesses. There are usually small livestock enterprises on the city wall and this trend decreases as we approach the centre.

Urban agriculture is not a conscious activity in Elazığ province. The contribution of urban agriculture to the socioeconomic and ecological structure of the city is still not fully understood. With the increasing population growth, urban agriculture has moved further away from the city centre. Due to the high value of the land in the city, the urban agriculture has been ignored.

3.2. Urban development of Elazığ province

Since 1834, the Harput community has descended to the Elazığ Plain, where agricultural activities are carried out [9]. Harput is a historical city where security needs come to the fore and military barracks dominate. Elazığ is a city where transportation and agriculture opportunities are considered [10]. After this date, Harput started to lose its importance gradually. The first establishment place of the city is the section with Sarayatik and Çarşı neighbourhoods [11].

The main urbanization phenomenon of Elazığ started after 1980s. After the 1980s, Elazığ entered a rapid urbanization process due to reasons such as development of transportation, increasing industrial investments, establishment of regional directorates, opening of the university and construction of the Keban Dam in 1974. After this date, agricultural fields lost their agricultural characteristics with the effect of urbanization [9].

Today, Elazığ city shows a rapid development in vertical and horizontal directions [5]. The city centre, whose services are carried out by Elazığ Municipality, consists of 38 neighbourhoods [12].

3.3. The History of urban agriculture in Elazığ province

Elazığ and its surroundings have been one of the important centres where human communities have lived since ancient times. This place has been among the well-known regions since Palaeolithic ages. It has been one of the places preferred by people in the Neolithic and Chalcolithic ages [13].

Agricultural traditions in Elazığ province date back to very old times. Mamuret-ül-Aziz, which was known as that period, consists of wide and fertile valleys located between mountain ranges. Fırat and Murat rivers pass through here [14].

At the beginning of the twentieth century, Elazığ province was ranked 13th in terms of its share in the national income of the country. It is the 22nd largest agricultural region in the Ottoman Empire (including the Balkans) and its control and distribution functions of agricultural production are gathered in the Elazığ province [15].

The importance of agricultural crafts has been known by the notables of Harput. Community representatives were aware that agriculture was the main contributor to the development of the local economy of the Ottoman Empire and the welfare of the people of Harput. Therefore, in 1908, II. After the announcement of the Constitutional Monarchy, the idea of opening an agricultural school was put forward in Harput. This idea led people to work, the place was determined, money started to be collected. Meanwhile, the administrative level of the city also made various attempts to establish a textile factory in the Harput plain. In this way, silkworm growers operating in different villages will be able to bring the product they grow

here, turn it into silk and export it to Europe. But the start of World War I prevented the establishment of the agricultural school and the textile factory [15].

As in many regions of Anatolia, viticulture was very common in Harput and its surroundings [16]. Many grape varieties were grown in the region. Grape cultivation was made for different purposes such as edible, winter, dried nut, molasses and winemaking. In particular, wine growing has improved. Many mulberry trees have been grown because of silkworm and silk production. Mulberry is consumed both freshly and dried. Some of the dried mulberry has been turned into flour and used in desserts. Some of them are made of raki (Turkish drink) for use in meals, flaxseed and sesame seeds were grown and their oils were extracted. Although dairy products are not diverse, each family has produced enough milk products, cheese, curd, yogurt, butter, milk cream and sour cream. For a long time, Harput has been an important bazaar centre where people from the surrounding villages come and buy more agricultural tools [15].

It is rumoured that sericulture came to the Harput plain in the 1860s. With the increase of mulberry gardens, the city has turned into a silk-breeding centre. Mulberry fields have been created here and hundreds of family houses have been turned into silkworm production centres [15]. Elazığ has become the silk centre in the east of the Ottoman Empire and Bursa in the west. Even a silkworm school named “Darü'l Hakik” was established in Elazığ [10].

According to Saraçoğlu [17], one of the most important income sources of the region was "weaving". Harput and its surroundings are specialized in making silk fabrics called “Cicekli, Ceharkezi and Cetari”. In addition to meeting the needs of the local people, the woven silk fabrics were sent to neighbouring provinces and Istanbul for sale [16].

Hüseyinik neighbourhood (now called Ulukent) become famous for its red and blue printing production. Summer clothes required for the soldiers of the Ottoman army were prepared here. The Syriac fence, which is produced in Harput region, has a red fabric type and sold in every Ottoman province, has become a very popular fabric. In order to dye the fabrics produced by the weavers, special dyes with a century-old history, which have been passed down from generation to generation as a professional secret, have been used. Root dye plant (*Rubia tinctorum*), fresh walnut shell, thuja and different plants were used to obtain durable red dye [15].

According to Baykara [18], the plant called Cehri used in yellow paint production around Harput was grown in large quantities. In Harput region, 130.000 tons of Cehri was produced towards 1885 and sent to Europe via Samsun province. Later, with the advent of artificial dyes, its production decreased, and in 1906 the amount of production decreased to 8.000 kilos [16].

Flaxseed was used to prepare candle oil. Many families have oil producing workshops. The flax seeds prepared here were exported to the surrounding cities. Throughout the 19th century, the cities and villages around Harput were brighten with this oil. Oil production decreased to a certain extent with the spread of kerosene lamps [15].

4. RESULTS AND DISCUSSION

Urban agriculture is one of the most important concepts of sustainable development as it addresses almost every aspect of sustainability. Urban agriculture is part of the urban ecological system and can play an important role in the urban environmental management system [19].

Urban farming styles are practiced in various forms and scales worldwide. Urban agriculture covers different forms from plants grown in small containers to large farms. There are many examples of cities in the world where agriculture is integrated into urban policies and strategies as a land use activity on a local, regional, national or global scale.

Integrating agriculture into cities encompasses a variety of forms, from incorporating agriculture in urban planning to developing close food supply networks [20].

The "Social Urbanism Model" initiated by the Mayor of Medellin in Colombia between 2004-2007 is an important urban planning approach. This project, which includes urban gardens, has gained an international character in providing a significant investment in the poor and most violent neighbourhoods, and has taken as an example world strategy to modernize and beautify the city [21].

Since the early 2000s, China has started to adopt a development strategy known as the "Urban Rural Integration Policy". Cities are integrated with rural areas in this process. As a result, village lands were transformed into state-owned urban development areas. One of these policies, the Plant Basket Program (cailanzi gongcheng), covers regional policies and plans to ensure an adequate regional supply of fresh vegetables, meat, dairy and seafood products. This has had successful regional results in most of China. According to estimates, the proportion of vegetables produced and consumed within the municipal boundaries was 40% in Beijing, 50% in Shanghai, 40% in Nanjing and 70% in Chengdu [22]. These examples have given rise to some insights into developing more sustainable cities that incorporate urban agriculture into open space infrastructure.

Urban agricultural practices vary from region to region and are carried out in different types, scales and locations. Uncertain regulations may deter urban food production. Producers may avoid producing food for fear of possible violations or penalties due to uncertainty. It should be clearly stated which parts of the city will be allocated to urban agriculture. Identifying areas that could potentially be used for urban agriculture

should include micro-planning elements. According to the urban agricultural production scale, large-scale areas should be located at the city periphery, and small-scale areas should be located close to the city centre (see Figure 5).



Figure 5: Urban agriculture production scale.

Women make up an important part of the urban agriculture population, as farming, processing and sales activities related to urban agriculture can often be combined with other tasks at home more easily. A high level of education is not required for urban agricultural activities. For this reason, urban agriculture can be implemented as an employment tool for women and children with low education level in Elazığ province.

According to the data of Boğaziçi University Kandilli Observatory, many neighbourhoods where the old settlements were located in the city centre were completely damaged due to the 6.8 magnitude earthquake that occurred in Sivrice district of Elazığ Province on January 24, 2020. Urban agriculture can be integrated into the redesign and planning of these neighbourhoods.

During the pandemic period that affects all countries in the world, sustainable urban agriculture can be an important tool both in the protection of the environment, biodiversity and natural resources, and in the provision of reliable food for the city people.

In recent years, with the increase in population density in settlements in the city, the importance of building elements such as roofs, balconies, terraces and walls has increased. Roof and terrace gardens are of great importance as they support some insect and bird populations. Green walls can help shape courtyards and gardens both ecologically and from a human health standpoint. A prime example in this area is the richly diverse planted wall gardens of artist and botanist Patrick Blanc. Balcony, terrace, wall and roof gardens can be used in terms of urban agriculture in every neighbourhood in the city of Elazığ. However, it is even more important in neighbourhoods with high population density.

Recent studies have revealed that home gardens cover a significant part of the green areas of the city [23].

According to Oluoch et al. [24] the main characteristics of a home garden are:

- It is convenient to work at any hour because it is close to home
- Micro-scale, usually the size of a small plot
- Production is primarily for household consumption
- Management of the garden is provided by the household (wife, husband, children)
- Close to the water source
- Low-cost inputs are used
- Suitable for the cultivation of different types of vegetables
- Local vegetables and fruits are grown more.

Home gardens are traditionally used in the neighbourhoods of Elazığ city area. It can be given priority to home gardens in the neighbourhoods where single or two-storey houses where low-income people live are densely located. Neighbourhoods with high population density and suitable for roofs, balconies, terraces and wall gardens are shown in Table 2 in the Elazığ central area. The use of home gardens is traditionally done in the neighbourhoods within the Elazığ central area. In neighbourhoods where single or two-storey houses with gardens and low-income people are concentrated, home gardens can be given priority.

Site gardens are very important in terms of providing social environments for people living on the same site. While the zoning areas are developing, the areas where agricultural activities can be carried out should be included in the planning. In the neighbourhoods where the site areas are dense and suitable, urban agricultural areas can be created in the site gardens. Urban agricultural areas can be created in site gardens in neighbourhoods such as Ataşehir, Çayda Çıra, Sürsürü, which are newly opened for development, and in neighbourhoods where site areas such as Abdullahpaşa, Cumhuriyet, Çatalçeşme, Doğukent, Hilalkent, Karşıyaka, Olgunlar, Ulukent are dense and suitable.

There are many empty, unused, abandoned and idle lands in the city. Fertile lands in cities that have not yet turned into concrete areas can be turned into individual gardens. Local administrations can inventory the vacant lands in the city and rent them temporarily or periodically to be used in urban agricultural activities. Urban agriculture practices can be carried out in unused empty areas in all neighbourhoods within the Elazığ central area.

Table 2. Proposed agriculture typologies in the central districts of Elazığ.

Neighborhoods	Typology								
	Roofs Balconies Walls	Home Gardens	Site Gardens	Unused Empty Lands	Roadsides	Collective Gardens	Neighbourhood Parks	Institutional Gardens	Urban Farms
Abdullahpaşa		X	X	X	X		X	X	
Akpınar	X			X			X	X	
Aksaray		X		X	X	X	X	X	
Alayaprak		X		X	X	X	X	X	X
Ataşehir			X	X	X	X	X	X	
Cumhuriyet			X	X	X		X	X	
Çarşı	X			X			X	X	
Çatalçeşme		X	X	X	X	X	X	X	X
Çayda Çıra			X	X	X	X	X	X	
Doğukent		X	X	X	X	X	X	X	X
Esentepe		X		X	X	X	X	X	
Fevzi Çakmak		X		X	X		X	X	
Göllübağ		X		X	X	X	X	X	
Gümüşkavak		X		X	X		X	X	X
Harput		X		X	X	X	X	X	X
Hicret	X	X		X	X		X	X	
Hilalkent			X	X	X	X	X	X	
İcadiye	X			X			X	X	
İzzetpaşa	X			X			X	X	
Karşıyaka		X	X	X	X	X	X	X	X
Kesrik	X	X		X	X		X	X	
Kırklar	X	X		X	X		X	X	
Kültür	X	X		X			X	X	
Mustafapaşa	X	X		X	X		X	X	
Nailbey	X			X			X	X	
Olgunlar			X	X	X		X	X	
Rızaiye	X			X			X	X	
Rüstempaşa	X			X			X	X	
Salıbaba	X	X		X	X		X	X	
Sanayi	X	X		X	X		X	X	
Sarayatik	X			X			X	X	
Sugözü		X		X	X	X	X	X	
Sürsürü		X	X	X	X	X	X	X	
Ulukent		X	X	X	X	X	X	X	
Üniversite	X			X	X		X	X	
Yenimahalle	X			X	X		X	X	
Yıldızbağları		X		X	X	X	X	X	
Zafran		X		X	X	X	X	X	

The most well-known examples of green infrastructure in cities are found on the roadsides. Due to the aesthetic and functional properties it provides to the environment, many trees, shrubs, groundcovers, etc.

plants are used. However, with the increase in the number of vehicles in the city centres in recent years, the soils are faced with the threat of pollution due to the heavy metals caused by the heavy traffic circulation in the lands close to the highways. Cadmium, lead, nickel, zinc, mercury, copper and chromium are the leading heavy metals polluting the soil due to traffic. These heavy metals pose a threat to human and environmental health.

Heavy metal uptake of plants varies. In general, the highest amount of heavy metal accumulates in leaves; the lowest content accumulates in seeds [25]. Urban agricultural areas can be created by introducing restrictions in land planning for some products (such as not growing leafy vegetables in the areas close to the roads) on the roads where there is no traffic in the neighbourhoods of Elazığ city centre.

The term collective gardens refer to any cultivated land in which producer groups operate. These gardens are named differently according to the geographical region in which they are located. The term collective gardens is an umbrella term that encompasses various names such as family gardens or communal gardens in France, allotments in the UK, community gardens in the USA, hortas urbanas in Portugal. The first collective gardens have been established in the nineteenth century with increasing industrialization and urbanization [26].

Community gardens are a form of urban agriculture often reported to have food, social and environmental benefits [27]. Community gardens are today the largest component of urban agriculture. Community gardens are at the heart of any successful future work of urban agriculture [4]. Essentially, a community garden consists of land divided into small parcels for use by many individuals (or families), usually for food production. Production is usually done for personal use, family or friends. The resulting products are rarely sold. Community gardens members share responsibility for common areas. One of the main benefits of community gardens is, access to land for city dwellers who do not have enough space to grow their own food. These gardens provide access to fresh fruit and vegetables and engage residents with the local food system [28].

The planners of the city of Seattle in the USA saw urban agriculture as an integral and necessary component of the city's open space network and adopted the goal of "one private community garden for 2,500 households in each neighbourhood" within the comprehensive urban plan [4]. There is no community, allocation or hobby garden in Elazığ Province. Collective gardens can be established at different scales depending on the population densities in the neighbourhoods located in the city.

In densely populated neighbourhoods, neighbourhood or city parks are other suitable areas for urban agriculture. Located in Detroit, Michigan, USA, "Lafayette Greens Edible Urban Garden and Park" consisting of fully organic and productive gardens is designed as a tool to beautify the city centre and help

educate residents about health, environmental responsibility and how to grow food [1]. Provided that the standards regarding urban agriculture activities to be held in the parks by local administrations are determined, urban farming areas can be created within the park in all neighbourhoods within the city of Elazığ.

The most suitable lands for urban agricultural practices are public lands. Unused and idle land offers great opportunities for the creation of urban agricultural lands. In Elazığ, institutional gardens for food production, donation, education, social integration and hobby purposes can be used partially or completely for the purpose of spreading urban agriculture.

Urban farms are large-scale farms established on large lands around the city by individuals, private companies or public institutions to meet the food needs of the city or to make commercial profits, and where all kinds of plant and animal activities are carried out. There are many successful examples of urban farms in the world. Medical University of South Carolina Urban Farm Charleston, located in Charleston, South Carolina, USA, was originally a parking lot and non-productive green space, but was converted into an urban farm by landscape architect Bill Eubanks and has become a base for a variety of activities. In addition to producing food, the farm provides a service network that promotes healthy eating and living for college students and the people of the Charleston area [1]. In the province of Elazığ, urban farms can be established in neighbourhoods close to the city periphery.

Every city has a value. Historical places, local dishes, natural and cultural values are some of them. Urban agriculture is a unique opportunity for Elazığ province to stand out not only with its historical architecture but also with its green, healthy and agricultural spaces. Considering the potentials of Elazığ province, it has many opportunities in this regard. The evaluation of these opportunities depends on the people and the managers of the people. However, urban sustainability discourses have long been neglected in Elazığ's urban planning.

Consumption of local products is expressed as an important element of urban agriculture [29]. According to Bosco and Marcelli [30], urban agriculture will expand in many cities as the food movement to consume local products becomes widespread. Local food systems are seen as a strategic policy tool in cities, not only in terms of environment or food security, but also because of their contribution to rural-urban systems [18].

Local products are important in ensuring food safety based on the principle of human access to healthy and fresh food. There are many local plant varieties grown in Elazığ city. However, with the preference of imported seeds and seedlings with high economic returns, the demand for local varieties decreased. Although local varieties cannot compete with imported varieties economically, they are more valuable than imported varieties in terms of health and taste. Urban agriculture is of great importance in ensuring local

food security. Acquisition of cultural food habits and local food consumption experiences will begin with the integration of urban agriculture as part of the community's infrastructure systems.

Gender equality is a fundamental societal value. The inclusion of women in the development period covers the near future.

The position of women in the development process was mentioned for the first time in the 1970s, and how development projects affect men and women became the agenda. Following this, the "Women's Year Declaration" was published together with the United Nations First World Women's Conference in 1975 [31]. Urban agriculture offers special benefits to women as producers or suppliers of foodstuffs in cities. Urban agriculture is a viable alternative for women who do not have access to formal employment due to their limited education or sociocultural factors that limit their free movement. Urban agriculture often encourages the use of national practices. Urban agriculture requires little cash, given that it can be done with low capital, low inputs and technology. Therefore, it is affordable and accessible to women with limited education and resources. Urban women can reduce their agricultural food expenditures. Excess production can turn into income generating activities through the direct sale of foodstuffs in the market [32].

The vast majority of urban farmers in the world are women. Only women's labour is used in 80% of agricultural enterprises in Kampala. In Kenya, this rate is 56%. In Yaound, Cameroon, 87% of urban vegetable farmers are women. Poland, Thailand, Senegal and Zimbabwe are other countries where female producers are said to outnumber urban male producers [33]. Women, who are the main actors in all stages of the urban food system (production, processing, marketing, food sales, etc.), have a fundamental structure in being accepted as an important focus group for urban planners [34].

In order to determine the role of women in urban agricultural activities, first of all, it is necessary to define the people working in urban agricultural activities. According to the literacy status of Turkey Statistical Institute data, while the number of illiterate men in Elazığ 4.419; the number of illiterate women is 18.120 in 2017 [35]. Accordingly, the number of illiterate women is more than four times the number of illiterate men. A high level of education is not required for urban agricultural activities. For this reason, these activities can be easily implemented by women with low education levels.

Urban agriculture offers practical, sustainable and alternative solutions to poverty, unemployment and food security as an important tool of urban development with the employment and additional income it creates in urban areas. Urban agriculture can play an important role in the lives of women with low income, living in slums, having economic disabilities, low income and low standard of living. For this purpose, it is important for women to take an active role in democratic life, to strengthen their ability to participate

actively in society, to strengthen their positions in the family, to acquire basic skills and competencies, to ensure their integration into the labour market, and to contribute to social and economic equality.

Diyarbakır Hevsel (Efsel) Gardens which an important urban agricultural garden in Turkey has been nominated to UNESCO in 2013, while 2015 has been declared World Heritage by UNESCO. Hevsel Gardens, which reveal a unique value that is open to public use, can be an exemplary model for Elazığ Province.

Local administrations have a very important role in the development of urban agriculture. Urban agriculture should be included in local policies to ensure sustainability, to develop more accurate understanding of regional and urban food provision, to provide urban aesthetics, to provide urban environmental management and to increase the importance of public health and economic development in Elazığ province. Municipal policies should have embracing approaches that view urban agriculture as part of the entire urban food system, covering different sectors such as food, environment, health, land use at national and local levels.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

There is no conflict of interest among the authors.

CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

F.Ç.: Conceptualization, methodology, software, validation, formal analysis, investigation, resources, writing—original draft preparation.

Y.M.: Conceptualization, methodology, software, validation, formal analysis, investigation, resources, writing—original draft preparation.

O.A.: Conceptualization, methodology, software, validation, formal analysis, investigation, resources, writing—original draft preparation.




REFERENCES

- [1] Philips, A., 2013. *Designing Urban Agriculture: A Complete Guide to the Planning, Design, Construction, Maintenance, and Management of Edible Landscapes*. Canada, 276 p.
- [2] Topal, A. K., 2004. Evaluating the sustainability of Turkey's urbanization process. *Turkish Administrative Journal*. 107-130.
- [3] Boukharaeva, L. M., Marloie, M., 2015. *Family Urban Agriculture*. Springer International Publishing, Switzerland, 215 p.
- [4] Nordahl, D., 2009. *The New Urban Agriculture*. London, England, 195 p.
- [5] Şengün, M. T., Üstündağ, O., 2011. A Geographical View on the Distribution of Green Space Uses in Elazığ City Center. *Eastern Geography Magazine*; Vol 14, Number 22. Erzurum.
- [6] Elazığ Provincial Directorate of Agriculture and Forestry, 2020. Accessed on 09.10.2019 from <https://elazig.tarimorman.gov.tr/>

- [7] European Environment Agency (TÜİK), 2019. Accessed on 21.12.2023 from <https://www.eea.europa.eu/en>
- [8] Anonim, 2019. Accessed on 09.10.2019 from <https://www.nufusu.com>.
- [9] Mor, A., Çitçi, M. D., 2011. Environmental Problems of Elazığ City. Eastern Geography Magazine; Vol 13, Number 19. Erzurum.
- [10] Akdemir I. O., 2013. Geographical Analysis of the Urbanization Process of Elazığ. Fırat University Harput Application and Research Center, Harput Symposium From Past to Future, Elazığ.
- [11] Karakaş, E., 1999. Development of Elazığ City. Journal of Urban Agriculture. Volume: 9 Issue: 1, Page: 129-154, Elazığ.
- [12] Elazığ Municipality, 2019. Accessed on 09.10.2019 from <https://www.elazig.bel.tr>.
- [13] Baş, Y., 2016. History of Sarıyakup Village in Elazığ Province. Eastern Geography Magazine; Bingol University Journal of Social Sciences Institute, Year: 6, Volume: 6, Number: 12. Bingol.
- [14] Fırat University, 2019. Accessed on 28.01.2019 from <http://web.firat.edu.tr/cografya/eg/dogal.html#2.3.%20%C4%B0klim>
- [15] Anonim, 2018. Accessed on 15.12.2018 from <https://www.houshamadyan.org/tur/haritalar/mamuret-uel-aziz-vilayeti/harpot-ovasi/yerel-ozellikler/evler-ve-mimari.html>.
- [16] Hayli, S., 1992. Historical Geography of Harput. Ph.D. thesis, Fırat University, Elazığ.
- [17] Saracoğlu, H., 1956. Doğu Anadolu ,Cilt 1, Türkiye Coğrafyası Üzerine Etüdlr, Maarif Vekaleti Neşriyatı,İstanbul.
- [18] Baykara, T., 1988, Anadolunun Tarihi Coğrafyasına Giriş I, Türk Kültürünü Araştırma Enst. Yay.86, Seri 7, Sayı A. 7, Ankara.
- [19] Bruinsma, W., Hertog, W., 2003. Annotated Bibliography on Urban Agriculture. Leusden, The Netherlands: ETC-RUAF Foundation, pp. 446-467. http://www.ruaf.org/sites/default/files/annotated_bibliography.pdf
- [20] Callau, S., Montasell, J., Villa, A., 2017. Food Cells and Food Nodes. Two new concepts for rethinking traditional urban and food planning practices. The case of Barcelona's metropolitan region (pp: 111-128). In: Soulard, C., Perrin, C., Valette, E. (Ed.), *Toward Sustainable Relations Between Agriculture and the City*. Springer International Publishing, Switzerland.
- [21] Hammelman, C., 2017. Relying on urban gardens for survival within the building of a modern city in Colombia (pp: 159-170). In: WinklerPrins, A. (Ed.), *In Global Urban Agriculture*. CAB International, Boston, USA.
- [22] Horowitz, S. S., Liu, J., 2017. Urban agriculture and the reassembly of the city: lessons from Wuhan, China (pp: 207-219). In: WinklerPrins, A. (Ed.), *In Global Urban Agriculture*. CAB International, Boston, USA.
- [23] Gray, L., Diekmann, L., Algert, S., 2017. North American urban agriculture: barriers and benefits (pp: 24-37). In: WinklerPrins, A. (Ed.), *In Global Urban Agriculture*. CAB International, Boston, USA.
- [24] Oluoch, M. O., Pichop, G. N., Silué, D., Onyango, M. O., Diouf, M., Shackleton, C. M., 2009. Production and Harvesting Systems for African Indigenous Vegetables (pp: 145-175). In: Shackleton, C. M., Pasquini, M. W., Drescher, A. W. (Ed.), *African Indigenous Vegetables in Urban Agriculture*, U.K.
- [25] Lock, K., Zeeuw, H., 2003. Health and environmental risks associated with urban agriculture. (pp: 244-278). In: Sida (Ed.), *Annotated Bibliography on Urban Agriculture*. Stockholm, Sweden.
- [26] Scheromm, P., Mousselin, G., 2017. The Proliferation of collective gardens in Lisbon (Portugal) and Montpellier (France): Urban residents demand and municipal support (pp: 201-218). In: WinklerPrins, A. (Ed.), *In Global Urban Agriculture*. CAB International, Boston, USA.
- [27] Byrne, J. B., Pickering, C. M., Guitart D. A., Castley, R., 2017. A Political ecology of community gardens in Australia: From local issues to global lessons (pp: 118-133). In: WinklerPrins, A. (Ed.), *In Global Urban Agriculture*. CAB International, Boston, USA.

- [28] Parece, T. E., Campbell, J. B., 2017. A survey of urban community gardeners in the USA (pp: 38-49). In: WinklerPrins, A. (Ed.), In *Global Urban Agriculture*. CAB International, Boston, USA.
- [29] Viljoen, A., Bohn, K., How, J., 2005. More food with less space: Why bother? (pp: 19-31). In: Viljoen, A., Bohn, K., How, J. (Ed.), In *Continuous Productive Urban Landscapes: Designing Urban Agriculture For Sustainable Cities*. Architectural Press, Oxford, UK.
- [30] Bosco, F. J., Marcelli, P. J., 2017. Gardens in the city: Community, politics and place in San Diego, California (pp: 50-65). In: WinklerPrins, A. (Ed.), In *Global Urban Agriculture*. CAB International, Boston, USA.
- [31] Doğan Günday, P., 2011. Ekonomik Kalkınmada Kadının Önemi ve Katkısı. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [32] Hovorka, A., 2003. Gender. (pp: 279-323). In: Sida (Ed.), *Annotated Bibliography on Urban Agriculture*. Stockholm, Sweden.
- [33] Dubbeling, M., Merzthal, G., 2006. Sustaining urban agriculture requires the involvement of multiple stakeholders (pp: 19-51). In: Veenhuizen, R. (Ed.), *Urban Agriculture for Green and Productive Cities*. Ruaf Foundation, Philippines.
- [34] Dulac, N., 2003. Reuse of organic wastes in agriculture. (pp: 511-553). In: Sida (Ed.), *Annotated Bibliography on Urban Agriculture*. Stockholm, Sweden.
- [35] Turkish Statistical Institute (TÜİK), 2019. Accessed on 09.10.2019 from <https://www.tuik.gov.tr>.

Energy Transfer Process and Process Gas Flow Model in Nitric Acid Production

Fadime Menekşe İkbal¹ , Oğuzhan Erbaş^{1*} , Özer AYDIN¹ 

¹ *Dumlupınar University Graduate Education Institute, Department of Mechanical Engineering, Kutahya, Turkey*

Received: 24.11.2023, Accepted: 04.12.2023, Published: 31.12.2023

ABSTRACT

In the Oswald process, ammonia is reacted with oxygen under the catalyst of platinum to form oxides, which are converted into acid. Acid nitriding processes are essential in industry, and many kinds of products, such as plastics, paints, and explosives, are obtained this way. Achieving energy savings and improving production reflexes by monitoring energy consumption on a process basis in such enterprises requires defining the current process flows and structure through a model and analyzing them with parameter changes. In this study, the energy transfer process of NO_x gases obtained in the ammonia oxidation reactor and used as process gas in a nitric acid production facility and the parameters affecting the process were investigated. The parameters affecting the efficiency were determined. The problems were addressed by considering the energy efficiency of the facility. The ammonia oxidation reactor is the most essential part of the system. For this reason, the operating parameters of the old reactors in the facility were compared with the revised new reactors. After the revision, the efficiency and performance of the system were examined in old and new reactors. In addition, the flow and hydrodynamic structure of the existing process gas in the new reactors were reviewed with the ANSYS Fluent program, that is, CFD analysis.

Keywords: Nitric Acid Production Process; Ammonia Oxidation Reactor; Process Gas; Flow Model

Nitrik Asit Üretiminde Enerji Aktarım Süreci ve Proses Gazı Akış Modeli

ÖZ

Ostwald prosesinde, platin katalizörlüğünde amonyak, oksijenle reaksiyona sokularak oksitler meydana getirilir ve bunlar da aside dönüştürülür. Asitle yapılan nitrolama prosesleri endüstride önemli olup, bu yolla plastikler, boyalar ve patlayıcı maddeler gibi pek çok çeşit ürün elde edilir. Bu tür işletmelerde prosesler bazında enerji tüketiminin izlenmesiyle enerji tasarrufu sağlanması ve üretim reflekslerinin geliştirilmesi, mevcut proses akışlarının ve yapısının bir model üzerinden tanımlanarak, parametre değişimleri ile analizini gerektirmektedir. Bu çalışmada, bir nitrik asit üretim tesisinde amonyak oksidasyon reaktöründe elde edilen ve proses gazı olarak kullanılan NO_x gazlarının enerji aktarım süreci ile prosesi etkileyen parametrelerin araştırılması yapılmış olup, verimliliği etkileyen parametreler belirlenmiştir. Tesisin enerji verimliliği göz önüne alınarak problemler ele alınmıştır. Amonyak oksidasyon reaktörü sistemin en önemli kısmıdır. Bu

nedenle tesisteki eski reaktörlerin işletme parametreleri ile yerine revize edilen yeni reaktörlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Revizyon sonrası eski ve yeni reaktörlerde sistemin verimliliği ile performansı incelenmiştir. Ayrıca yeni reaktörlerde mevcut proses gazının akışı ve hidrodinamik yapısı ANSYS Fluent programı yani CFD analizi ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nitrik Asit Üretim Prosesi; Amonyak Oksidasyon Reaktörü; Proses Gazı; Akış Modeli

1. INTRODUCTION

The earliest history of nitric acid dates back to the 14th century. At that time, royal water [1] (*aqua*), a solution that could dissolve gold and platinum regia) was used to produce. Under the influence of the First Industrial Revolution, Nitric Acid was produced from atmospheric air for industrial use in 1905 by the “Birkeland – Eyde” process [2]. It was built in 1913 with the “Haber- Bosch” process [3]; it is the leading industrial method used today for the production of ammonia.

The history of ammonia synthesis began at the beginning of this century when Haber and Bosch realized the economical production of hydrogen for the first time and the production of NH_3 directly from hydrogen and nitrogen. The Haber- Bosch process was discovered by German chemists Fritz Haber and Carl Bosch in the 20th century.

Converts hydrogen (H_2) and atmospheric nitrogen (N_2) into ammonia (NH_3) by using a metal catalyst under high temperatures and pressures. Although the Haber-Bosh process is used today mainly to produce fertilizer, during World War I, it was used as a source of ammonia for making explosives.

Chernyshev et al . studied the improvement process for the ammonia oxidation reaction. They have made improvements because the commissioning process in a nitric acid plant is one of the most critical stages in terms of safety and platinum loss in the entire ammonia oxidation process [4].

Chuah et al . demonstrated the design aspects of a shallow-bed reactor involving a swift, diffusion-controlled reaction. Methods for estimating the catalyst bed's mesh count, diameter, height, and volume are discussed [5].

Bartosz et al. described the effect of various design changes of the ammonia oxidation reactor in the nitric acid plant on the flow distribution of the air-ammonia mixture. CFD (computational fluid dynamics) simulations of turbulent flow were performed with the SST $k-\omega$ turbulence model to close the RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) system of equations [6].

Husaini et al ., a primary waste heat boiler (WHB) at an ammonia plant, experienced cap leakage and outer tube rupture ten months after the last repair and replacement. Therefore, Primary WHB examined the external pipe failure cap leak improvement [7].

Hamad et al. observed repeated failures in the outlet region of the superheater tube integrated into a waste heat boiler thermally coupled to an ammonia oxidation reactor. The primary root cause of repeated failures of superheater tubes is short-term overheating after rapid cooling of the lines due to the sudden stop of steam flow inside the connecting lines in case of shutdown of the unit, reducing the thermal resistance of the lines [8].

Hamed et al. simulated the flow distribution within a Monica oxidation reactor using Computational Fluid Dynamics (CFD) code. CFD results showed that the flow was unevenly distributed within the reactor due to the improper header design of the reactor [9].

The literature on nitric acid production facilities includes the importance of the ammonia oxidation reactor, catalyst selection, use, and properties, and NO_x released into the environment in nitric acid production. Strategies to reduce emissions and the importance of filtration are emphasized. Energy efficiency is also among the critical issues. For this, facility size, selection of machinery and equipment, heat utilization, stack emissions, and operating costs are among the essential factors.

The aim is to determine the heat transfer and pressure losses in the waste heat boiler of the ammonia oxidation reactor using the flow model. It is a challenge to find an analytical solution for this. The energy equations and turbulence models were solved using the ANSYS Fluent Analysis program. In a simplified approach, heat transfer and radiation from the outer body to the outside are neglected. The geometry was drawn with simple lines to obtain an analytical solution. Therefore, three-dimensional data was used under the specified boundary conditions.

In this study, the factors affecting the process efficiency of the nitric acid production facility were investigated, and the parameters affecting the efficiency were determined. The problems were addressed by considering the energy efficiency of the facility. The ammonia oxidation reactor is the most essential part of the system. For this reason, the old reactors in the facility were examined and compared with the newly revised reactors. After the revision, the efficiency and performance of the system were reviewed in old and new reactors. The flow and hydrodynamic structure of the new reactors were examined with CFD analysis of the ANSYS Fluent program. Compared with facility data. As a result, the facility data and numerical results were similar.

2. ENERGY TRANSFER PROCESS IN NITRIC ACID PRODUCTION

Nitric acid (HNO_3) is a vital mineral that is clear, colorless, and caustic. It is used in industry in the production of fertilizers and explosives. The basic nutrients that play an important role in the fertilizer industry are nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K). are sorted. The fertilizer to be produced depends on the nutrient to be used in the fertilizer production plants. It can be nitrogen, phosphorus, potassium, or complex fertilizer. Ammonia (NH_3), nitric acid (HNO_3), sulphuric acid (H_2SO_4), and phosphoric acid (H_3PO_4) are important industrial chemicals and, although used in industry, are mainly used in fertilizer production. The energy required in some fertilizer production plants comes from the plant's power stations. is met. For this reason, only the plants in the production phase are considered in assessing

such plants. Not only the plants but also the plants that supply energy should be considered. The physical and chemical properties of nitric acid are given in Table 1.

Table 1: Physical and chemical properties of nitric acid [10]

Nitric acid	55%
Water	45%
Appearance	Colorless, yellowish liquid
Smell	Sultry, sharp
Solubility in Water	Completely soluble
Density 20 °C	1,339 (55%)
pH	< 1.0
Boiling point	103.4 °C (20%) 120.4 °C (60%)
Freezing point	-17 °C (20%) -22.4 °C (60%)
Vapor Density	2
Vapor Pressure 20 °C	0.77kPa (60%)
Iron (ppm)	0.02
Chloride (ppm)	Maximum 5

The process is given in Figure 1 to improve environmental quality based on sustainability and volunteering, a business needs to know the consequences of its activities and the resulting environmental impacts. Environmental indicators express the resources consumed and the waste generated per unit product (kg, ton, etc.) produced in a business. These indicators are also called specific consumption or specific amounts of waste generated. Environmental indicators play an active role in businesses' ability to capture resource efficiency opportunities. By determining its environmental indicators, a business can see at which points it can make savings by implementing which practices. Wastewater, solid waste, and emissions generated during processes and other operational activities in the fertilizer industry are the main areas of impact.

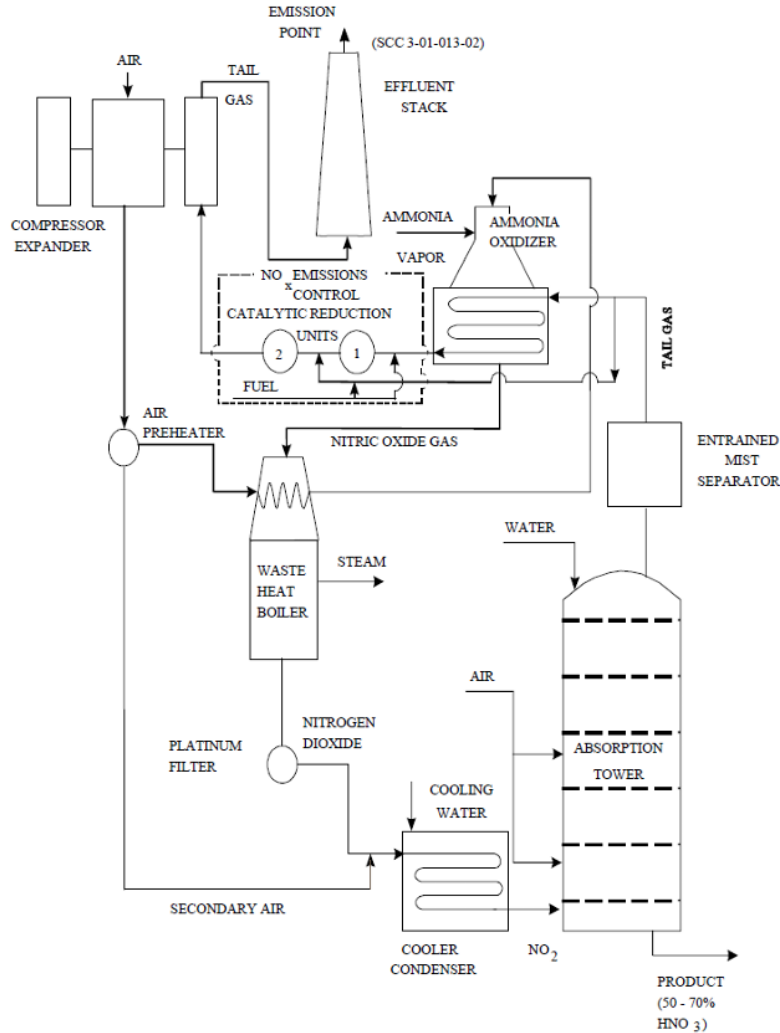


Figure 1: Nitric acid production process [11]

In the production of nitric acid, first, Ammonia is oxidized to obtain Nitric Oxide (Nitrogen Monoxide, NO), then NO is further oxidized to NO₂ (nitrogen dioxide). In the last stage, NO₂ gas is absorbed with water to obtain nitric acid (HNO₃). This cycle is called the Ostwald Process.

Nitric Acid Production Process Flow sequence is as follows [12]:

1. Filtration of entering air
2. Pressurization of air
3. Preparation of air/ammonia mixture
4. Catalytic ammonia oxidation (platinum/rhodium-based catalyst with a palladium braid to retain the catalyst, which subsequently evaporates)
5. Energy recovery and reheating of gases by utilizing reaction heat
6. Cooling of gases
7. Gas pressurization, energy recovery, and cooling processes (for dual pressure systems only)

8. Absorption of NO₂ gas to be converted into nitric acid
9. Flue gas (tail gas) heating
10. It generates electricity by operating a gas turbine by utilizing expansion while reducing the waste gases to atmospheric pressure.

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. General Equations in Turbulent Flow

ANSYS Fluent software is a program for the numerical analysis of flow and heat problems. General equations that represent flow problems are called Navier-Stokes equations. The Navier-Stokes equation, which governs flow problems in its most general form, consists of the continuity equation, momentum equation, and energy equation [13].

3.1.1. Continuity Equation

For all flow regions, the fluent program solves the following continuity equation.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla v = S_m \quad (1)$$

ρ ; intensity, speed, S_m ; is the mass added to the system (droplet, vapor, etc.), and t is time. In this study, $S_m=0$, and when three-dimensional, steady conditions are considered, time-dependent expressions are neglected.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (2)$$

The equation is written as (3), assuming the fluid density is constant.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

3.1.2. Conservation of Momentum equation:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (4)$$

P ; pressure, τ_{ij} ; stress tensor, ρg_i ; _gravitational force and F_i ; It represents external forces.

(i indicates the direction of flow.)

The final form of three momentum equations in incompressible flow (5), (6), (7) is written as;

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \nabla^2 u - p \left[\left(\frac{\partial \overline{u^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \right], \quad (5)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial \rho}{\partial y} + \mu \nabla^2 v - p \left[\left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \right], \quad (6)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu \nabla^2 w - p \left[\left(\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right) \right], \quad (7)$$

3.1.3. Energy Equation

$$\rho \frac{Dh}{Dt} - \frac{Dp}{Dt} = \phi - \nabla \dot{Q} \quad (8)$$

Here h = Enthalpy, Q = heat transfer, ϕ = dissipation (loss function due to irreversible viscous work)[14].

$$h = e + p / \rho \quad (9)$$

$$\dot{Q} = -k \nabla T \quad (10)$$

$$\phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (11)$$

3.2. Fluent Software Turbulence Models

Turbulence, middle and high Reynolds in numbers, in fluids observed 3D, is an unstable and irregular movement. Fluid movements generally involve low-viscosity fluids. Since it is based on almost all currents, it is turbulent. Turbulence is not a property of the liquid; the rough velocity field characterizes it. These turbulences are mixtures of transported quantities such as momentum, energy, and concentration. This study used the k- ω model, which is more suitable for fluids with high turbulence density; this model calculates scalable kinetic energy instead of kinetic energy.

3.2.1. *k- ω Turbulence Model*

An essential advantage of the $k-\omega$ formulation is the near wall calculation in low Reynolds number flows. This model is the complex required in the $k-\epsilon$ model. It does not need a non-linear damping function. Therefore, it gives more accurate and robust results. The $k-\omega$ model assumes that turbulent viscosity is related to turbulent kinetic energy and turbulence frequency [15].

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (12)$$

Beginning of the $k-\omega$ model by Wilcox [16]. This model solves two transport equations, one for the turbulence kinetic energy, k , and the other for the turbulence frequency, ω . The stress tensor is calculated according to the media-viscosity concept.

k equality;

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (13)$$

ω Equality;

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \omega) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + a \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (14)$$

In addition to the independent variables, the density velocity vector is assumed to be known from the Navier-Stokes equation. P_k is the turbulence production amount calculated as in the $k-\epsilon$ model.

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_T \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb} \quad (15)$$

Model constants $\beta'=0.09$, $a=5/9$, $\beta=0.075$, $\sigma_k=2$, $\sigma_\omega=2$

Unknown Reynolds Stress Tensor is calculated from the following equation.

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} \nabla \cdot U \quad (16)$$

To avoid the reproduction of turbulence kinetic energies in stagnation zones, a limiter was applied to the production term by Menter [17]

$$\bar{P}_k = \min (P_k, C_{lim} \epsilon) \quad (17)$$

3.3. Ammonia Oxidation Reactor Structure

The ammonia oxidation reactor consists of two parts: the combustion unit part (chemical reaction) and the waste heat boiler part that produces steam. The combustion unit part is shown in Figure 2, and the waste heat boiler with steam is shown in Figure 3.



Figure 2: Combustion unit section



Figure 3: Steam generating waste heat boiler

The oxidation reactor consists of three parts.

- Economizer (preheater): the part where the serpentine pipes are located.
- Evaporator (middle part): It is the part where pre-evaporation and evaporation occur.
- Superheater (upper part): This is the part where the superheaters are located.

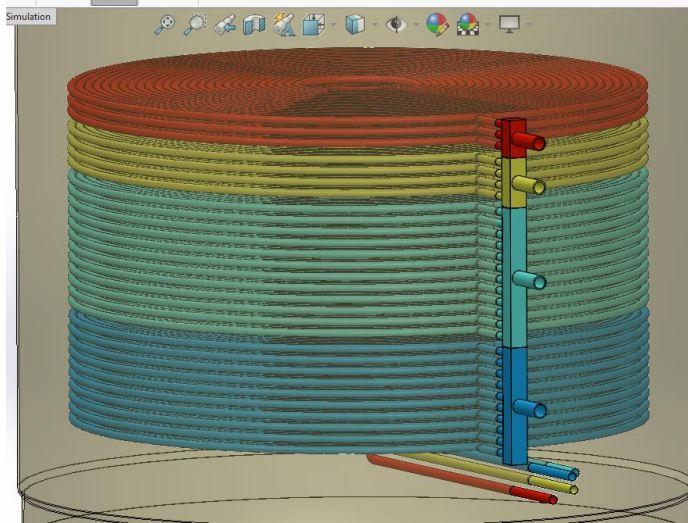


Figure 4: Steam generating waste heat boiler structure

The process process in ammonia oxidation reactors is as follows;

- ➔ In ammonia reactors, it starts with the reaction of a compressed air + gas ammonia mixture on a platinum catalyst.
- ➔ This chemical reaction is an exothermic reaction and as a result, heat and NO_x gases are released. (Reaction temperature is $850\text{-}900\text{ }^\circ\text{C}$).
- ➔ The heat released is used to convert the water in the reactor into steam and to drive the turbine.
- ➔ The turbine, driven by the steam it produces, turns the compressor and the compressed air required for combustion is obtained.
- ➔ Thus, the system operates in a cycle that produces its own energy.

This study was conducted in three stages.

1. Stage: Ammonia oxidation reactor efficiency parameters were determined. A comparison was made between the old and new reactors.
2. Stage: Ammonia oxidation reactor mass and energy balance were checked.
3. Stage: Numerical analysis of the ammonia oxidation reactor was performed. The numerical analysis stages were as follows. First, in the first stage, the ammonia oxidation reactor was drawn in 3D with exact measurements in the Solidworks 2021 drawing program. In the second stage, 3D meshes were created in ANSYS Meshing to make the appropriate mesh structure. Digital analyzes ANSYS fluent Version It was implemented in 2020 R2. NO_x flowing from the reactor main body gas and water flow through the coils since it is turbulent, turbulence is used to get closer results. Model aspect realizable k- ω turbulence model was chosen. Detailed information about the software used and the models selected is available here. Are given in the section. In addition, assumptions made with the model geometry initial and boundary conditions in this chapter have been explained.

3.3.1. Revision Study

When the Nitric Acid Producing Facility was examined, it was seen that the reactor caused 90 % of the malfunctions. The reactors were renovated to eliminate these shutdowns and increase efficiency. The waste heat boiler (WHB) of the old reactors and the waste heat boiler (WHB) of the new reactor were examined in terms of efficiency, and the winding shape of the coils was designed differently. While the serpentine of the old reactor were square, most of the malfunctions were caused by the serpentine. The body of the new reactor is spirally arranged for optimum efficiency. No serpentine-related stops have occurred since the revision. As a result, Figure 5 and Figure 6, when examined, can be seen that the inlet and outlet temperatures in the new reactor have been improved.

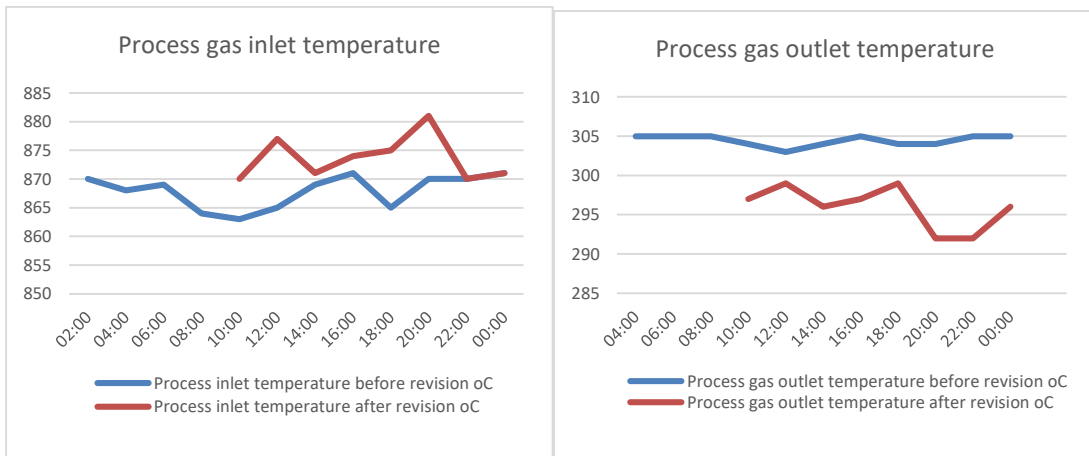


Figure 5: Changes in A and B reactor gas inlet and outlet temperatures

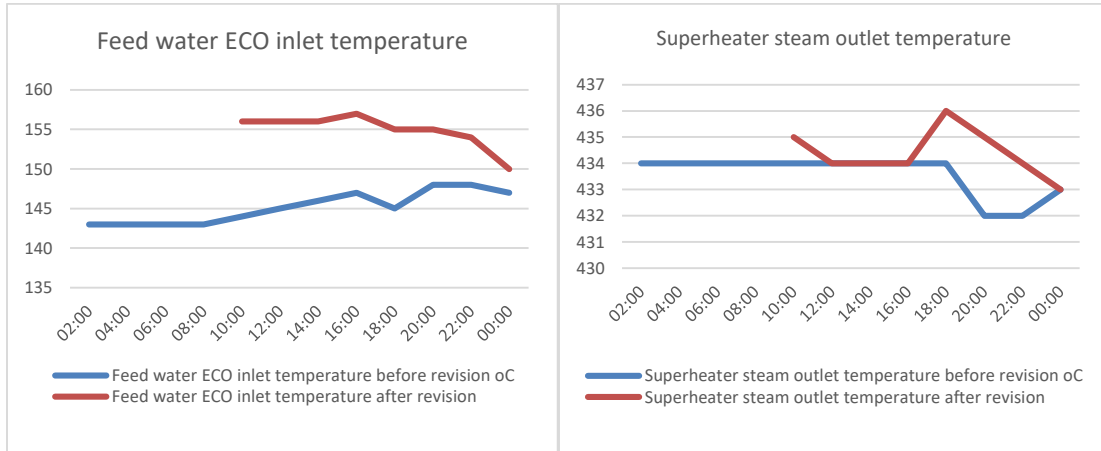


Figure 6: Changes in A and B reactor feed water ECO inlet and superheater steam outlet temperatures

With the renovation of the reactor, there was an increase hour in the amount of steam produced. There were no reactor-related malfunctions after the revision. Since there were no stoppages, production also increased. Since there was no stoppage due to the new changes, there was a 10 % increase in efficiency. Table 2 gives the operating parameters of the nitric acid plant before and after the reactor revision.

Table 2: Nitric acid plant operating parameters before and after reactor revision

	PRE-REVISION DATA	DATA AFTER REVISION
Sub platinum Temperature	865 - 870 °C	865 - 870 °C
NO gas output temperature	350 - 400 °C	250 - 310 °C
Superheated steam generation	33 t/h	36 t/h
Superheated steam temperature	410 °C	440 °C

3.3.2. Process Gas Flow Model

Under current operating conditions, the flow and hydrodynamic structure (velocity, temperature, and pressure distributions) of NO_x gas coming from the regions where the economizer, evaporator, and superheater coils are located were examined with the help of CFD analysis. The main structure of the analyzed reactor is shown in Figure 7. The reactor shown in Figure 7 was modeled 3D symmetrically from surface A, as shown below, with the help of the ANSYS- Space claim program, to examine the velocity, pressure, and temperature distributions of the waste gases formed after the reaction of 89 % air and 11 % NH₃.

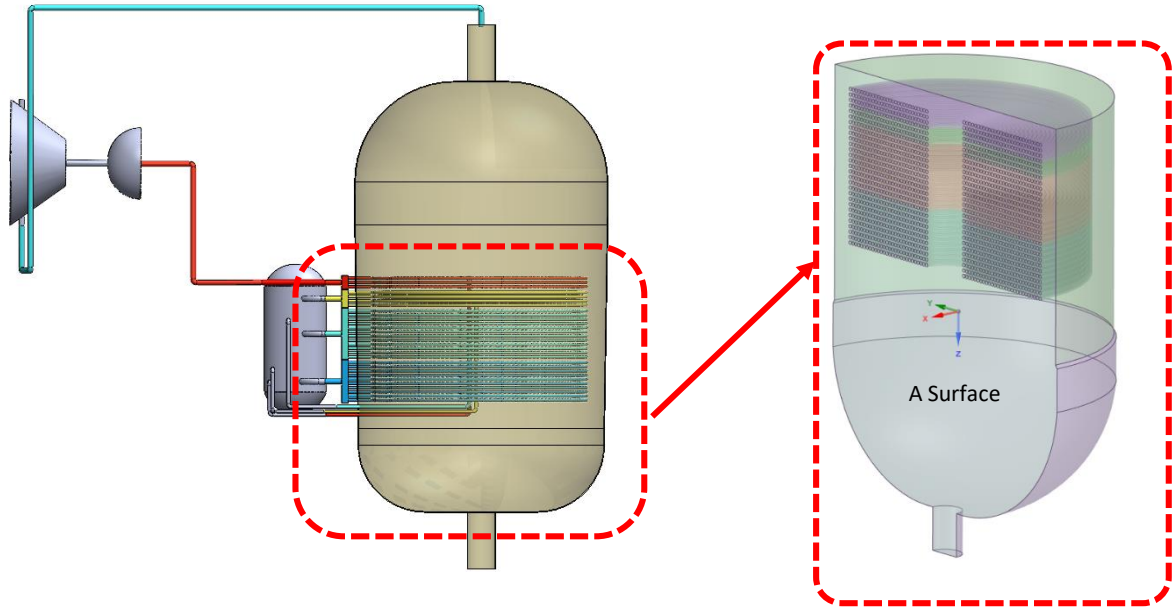


Figure 7: Ammonia oxidation reactor symmetric numerical model

The boundary conditions, gas properties, and material properties used for the analysis are also shown in Table 3.

Table 3: Inlet gas properties and material properties [18]

Characteristics of Inlet Gas		Material Properties	
Inlet Pressure	342,000 Pa	Outer Body Material	ST38.8
Input Speed	15 m/s	Superheater Pipe Material	13 CrMo4-5
Inlet Flow	51.525 Nm ³ /h	Vaporizer Pipe Material	P235GH
Inlet Temperature	870 °C	Pre-Evaporator Pipe Material	P235GH
Exit gas combustion products	H ₂ O 16.35 Vol %	Economizer Pipe material	SA213
	N ₂ 68.25 Vol %		
	NO 9.8 Vol%		
	O ₂ 5.6 Vol %		

With the help of Fluent software, Ansys simulations were carried out using the method and conservation equations below.

Table 4: Ansys fluent model parameters

Energy	Front		
Species Model	Species Transport Model- Mixture Material	Options	- Low -Re Correction - Viscous Heating -Curvature Correction -Production limiter -Buoyancy Effect (Full)
General	- Steady-state - Gravity (ten)		
Viscous Model	K- omega (2 equations)	Material	H ₂ O 16.35% N ₂ 68.25% NO 9.8% O ₂ 5.6%
K- omega Model	SST		

4. RESULTS

A reversible and exothermic reaction occurs between NH₃ and oxygen, producing process gas, i.e., nitrogen oxides (NO_x). Pressure and temperature values vary depending on the desired NO_x conversion rate. In addition, dilute and concentrated nitric acid production varies depending on the operating pressure of the process. In such enterprises, ensuring energy savings and improving production reflexes by monitoring energy consumption on a process basis requires defining the process flows and structure through a model and analyzing them with parameter changes. As shown in Figure 8, the reference plane is defined within the reactor to pass through the middle region of the system. The following section uses this reference plane to examine speed, pressure, and temperature contours.

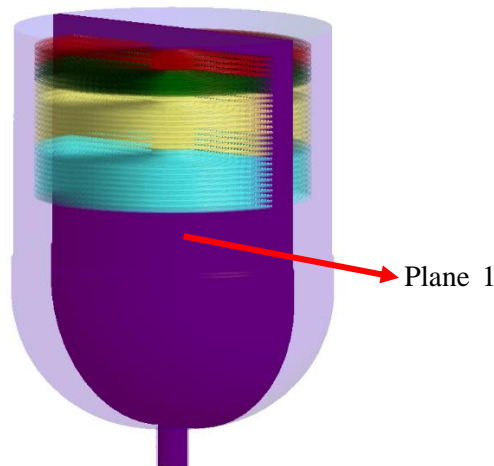


Figure 8: Reference plane (Plane 1)

The flow and hydrodynamic structure of the reaction mixture in the ammonia oxidation reactor were examined. CFD (computational fluid dynamics) simulation of turbulent flow looked at the velocity distribution. Figure 9 shows the analysis of velocity distribution contours obtained from ANSYS Fluent CFD. As a result of the study, the exit speed was obtained as 127 m/s. The rate increased due to the narrowing of the cross-section at the exit. The analysis model input and output parameter values are given in Table 5.

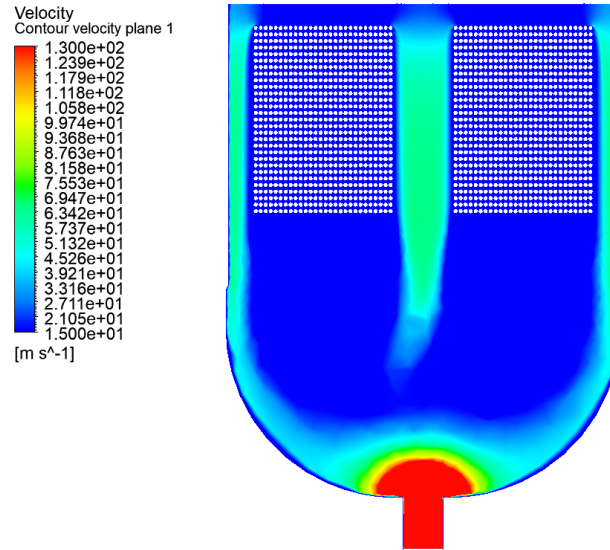


Figure 9: Velocity distribution obtained as a result of ANSYS Fluent CFD

Table 5: Analysis of model input and output values

Velocity (m/s)		Pressure (Pa)		Temperature (°C)	
Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
15	127	342000	237465	870	337

Figure 10 shows the temperature distribution contour analysis due to ANSYS Fluent CFD analysis. The temperature of the gas entering the system was determined as 870 °C, and the gas exit temperature was defined as 337 °C. This obtained value coincides with the facility data. The inlet pressure of the gas entering the system was defined as 342 kPa, and the outlet pressure of the gas was determined as 237.5 kPa. All values obtained were compatible.

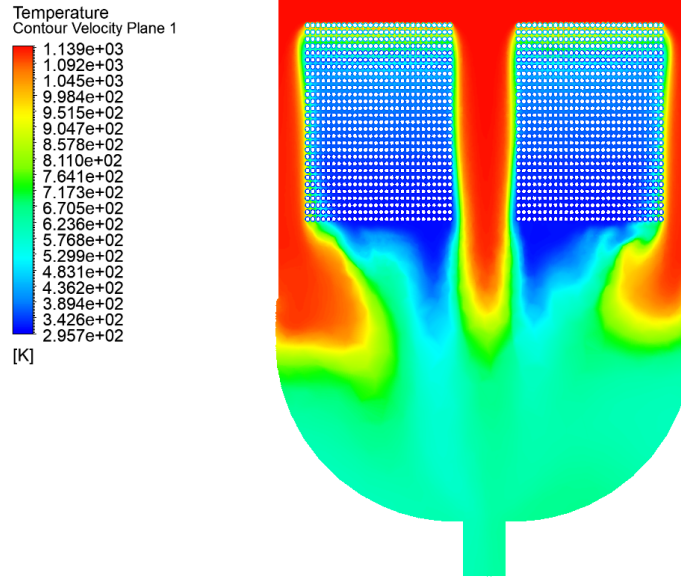


Figure 10: Temperature distribution obtained as a result of ANSYS Fluent CFD

5. CONCLUSIONS

In large industrial facilities, saving energy and improving production reflexes by monitoring energy consumption on a process basis requires defining the current process flows and structure through a model and analyzing them with parameter changes. In this study, the energy transfer process of NO_x gases obtained in the ammonia oxidation reactor and used as process gas in a nitric acid production facility and the parameters affecting the process were investigated, and the parameters affecting the efficiency were determined. With the help of Computational Fluid Dynamics (CFD), detailed calculations were made and the flow field and other physical details were shown. The results of CFD analyses provide significant benefits in the simulation-based product design process, which helps simulate the operation of the product, and any problems, in the computer environment, and optimizes product performance.

CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

There is no conflict of interest between the authors.

CONTRIBUTIONS OF THE AUTHORS

F.A.: Methodology, software, validation, investigation, resources, writing—original draft preparation.

S.A.: Methodology, validation, resources, editing.

T.A.: Methodology, software, validation.

REFERENCES

- [1] Mellor, J. W. (1922). Supplement to Mellor's Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry: suppl. 3. K, Rb, Cs, Fr. Dary, G., (1913) *The Production of Nitrates by the Direct Electrolysis of Peat Deposits*, London Electrical Review, 73: 1020-1021.
- [2] Modak, J. M. (2002). Haber process for ammonia synthesis. *Resonance*, 7(9), 69-77. Chernyshev, V. I., & Zjuzin, S. V. (2001). Improved start-up for the ammonia oxidation reaction. *Platinum Metals Review*, 45(1), 22-30.
- [3] NurSulihatimarsyila A. W., Chuah T.G., Choong S. Y., Thayananthan.B (2005) *Estimation of Platinum Gauzes Catalyst for Ammonia Oxidation of Nitric Acid Production*, The Institution of Engineers, Malaysia Volume 66, Issue 4.
- [4] Moszowski, B., Wajman, T., Sobczak, K., Inger, M., & Wilk, M. (2019). The analysis of distribution of the reaction mixture in ammonia oxidation reactor. *Polish Journal of Chemical Technology*, 21(1), 9-12.
- [5] Ardy, H., Putra, Y. P., Anggoro, A. D., & Wibowo, A. (2021). Failure analysis of primary waste heat boiler tube in ammonia plant. *Heliyon*, 7(2).
- [6] Abbasfard, H., Ghanbari, M., Ghasemi, A., Ghader, S., Rafsanjani, H. H., & Moradi, A. (2012). Failure analysis and modeling of super heater tubes of a waste heat boiler thermally coupled in ammonia oxidation reactor. *Engineering Failure Analysis*, 26, 285-292.
- [7] Zanoni, M. A., Wang, J., & Gerhard, J. I. (2021). Understanding pressure changes in smouldering thermal porous media reactors. *Chemical Engineering Journal*, 412, 128642.
- [8] Gemlik Gübre Sanayi A.Ş., (2003), Nitric Acid According to Safety, *Data Sheet 91/155/EC*
- [9] Gabrielson, J. E. (1964). Potassium-nitrate from nitric acid and potassium-chloride. Iowa State University.
- [10] National Research Council. (2004). *Air quality management in the United States*. National Academies Press.
- [11] Yadav, A. S., Shukla, O. P., Sharma, A., & Khan, I. A. (2022). CFD analysis of heat transfer performance of ribbed solar air heater. *Materials Today: Proceedings*, 62, 1413-1419.
- [12] Papa, F., Vaidyanathan, K., Keith, T. G., & DeWitt, K. J. (2000). Numerical computations of flow in rotating ducts with strong curvature. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 10(5), 541-557.
- [13] Fluent Incorporated (1998). *FLUENT User's Guide*. Version 6.1,
- [14] Suga, K. (2003). Predicting turbulence and heat transfer in 3-D curved ducts by near-wall second moment closures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(1), 161-173.
- [15] Lim, K. W., & Chung, M. K. (1999). Numerical investigation on the installation effects of electromagnetic flowmeter downstream of a 90 elbow–laminar flow case. *Flow Measurement and Instrumentation*, 10(3), 167-174.
- [16] Heselton, P. E. (Ed.). (2020). *Boiler operator's handbook*. CRC Press.

The Effect of Tunneling on The Piled Foundation in Layered Soils

Hossein Zoriyeh Aligholi¹, Onur Yavan^{2*}

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, İstanbul University-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kırklareli University, Kırklareli, Türkiye

Received: 04.12.2023, Accepted: 27.12.2023, Published: 31.12.2023

ABSTRACT

It is believed that tunnel construction will have significant and intricate effects on structures supported by piles. One of the most popular approaches to research is numerical modeling. This study looked into how tunnel placement affected piled foundation systems in layered soil. In sixteen models utilizing PLAXIS 2D finite element analysis, a square foundation with dimensions of 26×26×2 meters and a load of 200 kPa was applied to the soil profile representing İstanbul's Avcılar district. In the 11×7 formation, two groups of piles were created, each with a fixed spacing of 2.4 meters and varying diameters of 0.8, 1.2 with 30 meters in length. The piles were placed 4 meters out of the plane and 1 meter from the edges. For every pile group, a 10-meter-diameter tunnel was examined at two various Z/D and four various X/D from the foundation's center to determine the influence of the tunnel location. According to the results, the surface total settlement values decrease, and the differential settlements increase as the tunnel is positioned farther in the x direction from the foundation center axis. The pile's bending moment slightly decreases as the tunnel's horizontal location gets farther away from it. The tunnel's effect decreases with increasing distance within the influence zone. Tunnel settlement cannot be significantly reduced by deepening the tunnel or increasing the pile's diameter.

Keywords: Tunnel; Piled Foundation; Settlement; Finite Elements.

Tabakalı Zeminlerde Tünel Açmanın Kazıklı Temel Üzerindeki Etkisi

ÖZ

Tünel inşaatının kazıklarla desteklenen yapılar üzerinde önemli ve karmaşık etkileri olacağına inanılmaktadır. Araştırma için en popüler yaklaşımlardan biri sayısal modellemedir. Bu çalışmada, tünel yerleşiminin tabakalı zeminlerde kazıklı temel sistemlerini nasıl etkilediği incelenmiştir. PLAXIS 2D sonlu eleman analizinin kullanıldığı on altı modelde, İstanbul'un Avcılar ilçesini temsil eden zemin profiline 26×26×2 metre boyutlarında kare bir temel ve 200 kPa yük uygulanmıştır. 11×7 formasyonunda, her biri 2.4 m sabit aralıklı ve 30 m uzunluğunda 0.8, 1.2 değişen çaplarda iki grup kazık oluşturulmuştur. Kazıklar düzlemin 4 m dışına ve kenarlardan 1 m uzağa yerleştirilmiştir. Her kazık grubu için, tünel konumunun etkisini belirlemek amacıyla temel merkezinden iki farklı Z/D ve dört farklı X/D noktasında 10 m çapında bir tünel incelenmiştir. Sonuçlara göre, tünel temel merkez ekseninden x yönünde uzaklaştıkça yüzey toplam oturma değerleri azalmakta ve diferansiyel oturmalar artmaktadır. Kazık eğilme momenti, tünelin yatay konumundan uzaklaştıkça hafifçe azalmaktadır. Tünelin etkisi, etki bölgesi içinde artan mesafe ile azalır. Tünel oturması, tünelin derinleştirilmesi veya kazık çapının artırılmasıyla önemli ölçüde azaltılamaz.

Anahtar Kelimeler: Tünel; Kazıklı Temel; Oturma; Sonlu Elemanlar.

1. INTRODUCTION

In metropolitan areas, the effects of tunnel construction on nearby structures are thought to be profound and complex. For buildings that are supported by piles, this problem may be more significant. Several finite element analyses were also carried out by some researchers to investigate the effects of tunnels on existing pile foundations. Jongpradist et al, used the advanced soil models in PLAXIS to run numerical simulations of tunneling in the Bangkok subsoil. PLAXIS 2D analyzes all issues from well-documented case histories using reliable monitored data, assuming a plane strain condition with the appropriate analysis condition (Jongpradist, P., Detkhong, T., and Youwai, S., 2012). Shabna et al., in their research, applied a 2D numerical model to analyze and predict the detailed performance of the tunnel system. Predicting the stress distributions and soil deformations that result from the tunnel construction process and taking the necessary precautions are essential to avoiding damaging existing buildings or foundations in the soil above. They showed that these effects can be achieved using the finite element method (Shabna, P. S., & Sankar, N., 2006).

Rishik discusses in his thesis the influence of a newly built tunnel on the existing pile foundation using the FEM (Finite Element Method), so the aim of this paper is to provide a parametric study to assess the extent of the settlement problem near piles. According to the variation in the pile's overall displacement, there is a variation in the tunnel's position. Only when the tunnel passes very close to the pile foundation does it affect the building structure's piled foundation; when the tunnel is located far from the building structure, its impact is negligible (KUMAR, 2022). Swetha et al, investigated the behavior of a pile group resulting from tunnel construction below ground using a two-dimensional finite element analysis using PLAXIS 2D. Additionally, it was found that when the tunnels were moved horizontally away from the building at a specific depth, the settlement decreased. In terms of reducing settlement, an increase in the horizontal distance between tunnels and the building is more significant than tunnel depth increments. To comprehend the settlement decrement pattern, a 45° pressure distribution line was drawn. For every twin tunnel location, the cross-sectional area of the tunnel that overlapped with the building load influence region was calculated. It was discovered that the building's settlement changed in tandem with variations in the overlapping region. All the tunnel locations showed signs of differentiating pile groups. However, it was discovered that when the pile group's horizontal and vertical depths increased, the disparity in the settlement of the individual piles decreased (Swetha, B., Sangeetha, S., & Hari Krishna, P., 2022).

Many researchers have previously used the FEM method to investigate tunnel and piled foundation interactions (Deshmukh, R., & Patil, P., 202) (El Houari, N., Taleb, O., Hamzaoui, F., & Bachir, E., 2022) (Raja, M. K., Premalatha, K., & Hariswaran, M. S., 2015) (Salim, N. M., & Lafta, S. J., 2020). Two sets of

piles, each with a different diameter and fixed length and spacing, were formed in the 11*7 formation for this study to ascertain how tunneling and its location affected the settling of the piled foundation system. For each pile group, a 10-meter-diameter tunnel was examined at two distinct depths and four different horizontal positions from the foundation's center to determine the effect of the tunnel location. Through modeling and analysis, the settlement and other parameters were ascertained for the sixteen distinct designs using the Plaxis 2D finite element analysis program.

2. MATERIAL AND METHODS

In this research, the effect of tunneling on the settlement of pile foundation systems built on layered soils was investigated. For this purpose, a square foundation with dimensions of 26*26*2m and a load of 200 kPa, equivalent to the load of a high-story building, was applied. Table 1 lists the characteristics of the soils used in the models, which use various sources to simulate the soil of Istanbul’s European side. Modeling is done with finite element software called “PLAXIS 2D”. The embedded pile model was used to model the piles, while the foundation and tunnel were represented as plates. To determine how tunneling and its position affected the settling of the piled foundation system, two groups of piles were formed in the 11*7 formation, each with a different diameter of 0.8, 1.2 meter and 30 meters in length and a fixed spacing of 2.4 meters. The piles were placed 4 meters out of the plane and 1 meter from the edges. A tunnel with a 10-meter diameter was inspected for each pile group at two different depths and in four different horizontal positions from the center of the foundation to ascertain the impact of the tunnel position. The parameters used for piles, foundation and tunnel are presented in Table 2, Table 3, and Table 4, respectively. Z/D and X/D ratios indicated in Table 4 are respectively the ratio of the distance from the central axis of the tunnel to the central axis of a pile group to the tunnel diameter and the ratio of the net distance of the pile toe and tunnel cover to the tunnel diameter. These concepts and the model schematic are shown in Figure 1.

Table 1: Soils input parameters (DALGIÇ, S., TURGUT, M., KUŞKU, İ., COŞKUN, Ç., & COŞGUN, T., 2009) (Ertürk, 2015) (REZAI.A, 2013) (Tezcan, S. S., Kaya, E., Bal, I. E., & Özdemir, Z. , 2002).

		1	2	3	4	5
<i>Formation</i>	<i>Unit</i>	<i>ML</i>	<i>Limestone</i>	<i>CH</i>	<i>Sand</i>	<i>CH</i>
Thickness	<i>m</i>	10	7.5	4	15	64
γ_{sat}	<i>kN/m³</i>	19.0	21.0	19.0	18.0	18.0
γ_{dry}	<i>kN/m³</i>	16.0	19.0	16.0	16.0	16.0
<i>Poisson's Ratio</i>	-	0.35	0.20	0.30	0.30	0.20
E_{ref}	<i>MPa</i>	12	582	55	122	113
ϕ	<i>°</i>	7	35	25	40	16
<i>c</i>	<i>kPa</i>	15	40	35	25	45

Table 2: Piles input parameters.

<i>Material type</i>	<i>Elastic</i>	<i>Unit</i>
<i>D</i>	0.8, 1.2	<i>m</i>
<i>L</i>	30	<i>m</i>
<i>S</i>	2.4	<i>m</i>
<i>L_{spacing}</i>	4.0	<i>m</i>
<i>Unit Weight</i>	24.0	<i>kN/m³</i>
<i>E_{ref}</i>	2×10^7	<i>kN/m²</i>
<i>Poisson's Ratio</i>	0.15	-

Table 3: Foundation input parameters.

<i>Dimensions</i>	26×26	<i>m</i>
<i>Thickness</i>	2.0	<i>m</i>
<i>Unit Weight</i>	24.0	<i>kN/m³</i>
<i>E_{ref}</i>	2×10^7	<i>kN/m²</i>
<i>Poisson's Ratio</i>	0.15	-

Table 4: Tunnel input parameters

<i>D</i>	10	<i>m</i>
<i>Thickness</i>	0.5	<i>m</i>
<i>Unit Weight</i>	24.0	<i>kN/m³</i>
<i>E_{ref}</i>	2×10^7	<i>kN/m²</i>
<i>Poisson's Ratio</i>	0.15	-
<i>X/D</i>	0, 1, 2, 3	-
<i>Z/D</i>	0.5, 1	-

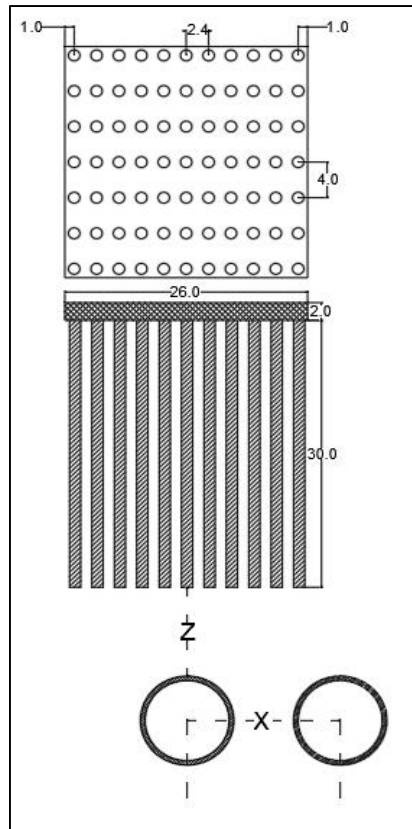


Figure 1: The dimensions of the piled foundation and the tunnel's placement in relation to it.

The combinations of the sixteen different models that were developed are shown in Figure 2.

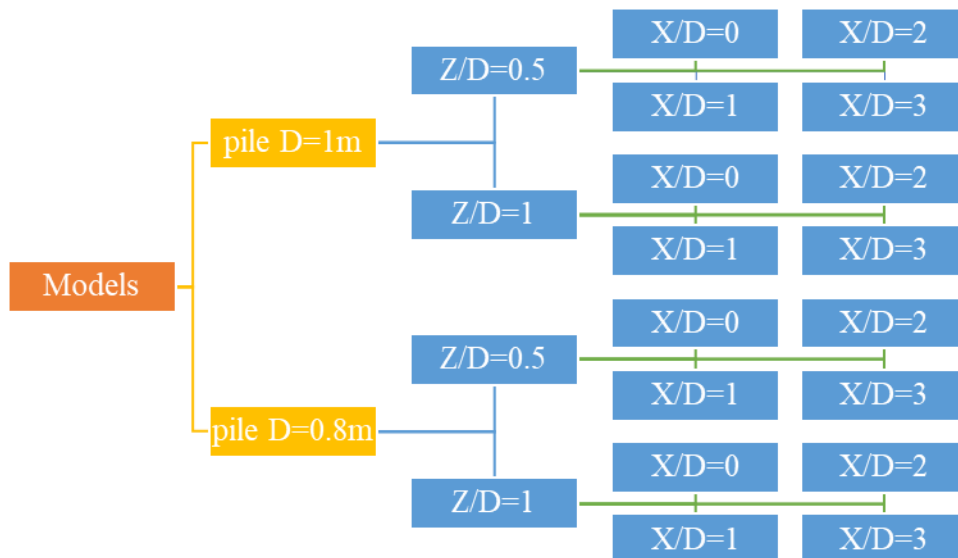


Figure 2: Models combinations.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. Effect of Tunnel on The Surface Settlement

Figures 3-6 illustrate the impact of two Z/D and four X/D variations on the amount of surface settlement for various pile diameters. The graphs below show that as the tunnel gets deeper, the settlement's value decreases with an increasing Z/D value. It can be said that the total settlement values decrease as the tunnel is located further from the foundation center axis in the x direction. However, differential settlements might take on greater significance. The figures show that the most crucial circumstances for each analysis are those in which $X/D=1$.

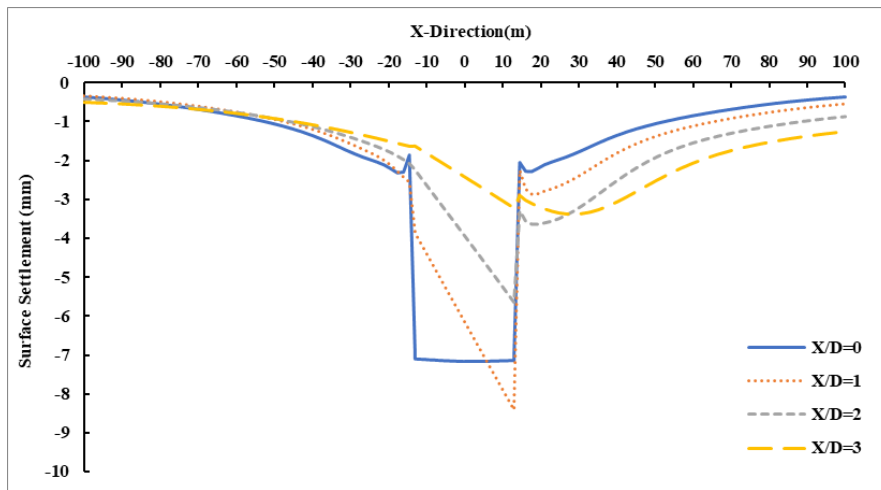


Figure 3: Variation in surface settlement with respect to X/D for piles with a diameter of 0.8m and $Z/D = 0.5$.

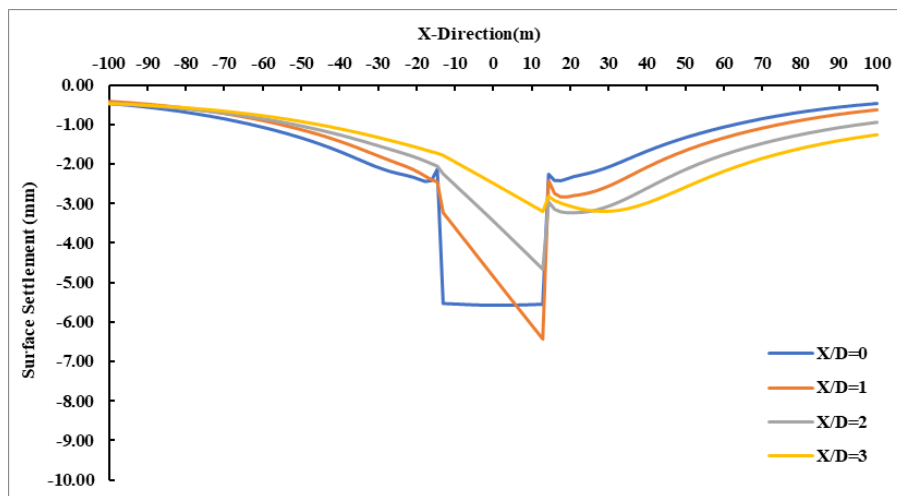


Figure 4: Variation in surface settlement with respect to X/D for piles with a diameter of 0.8m and $Z/D = 1$.

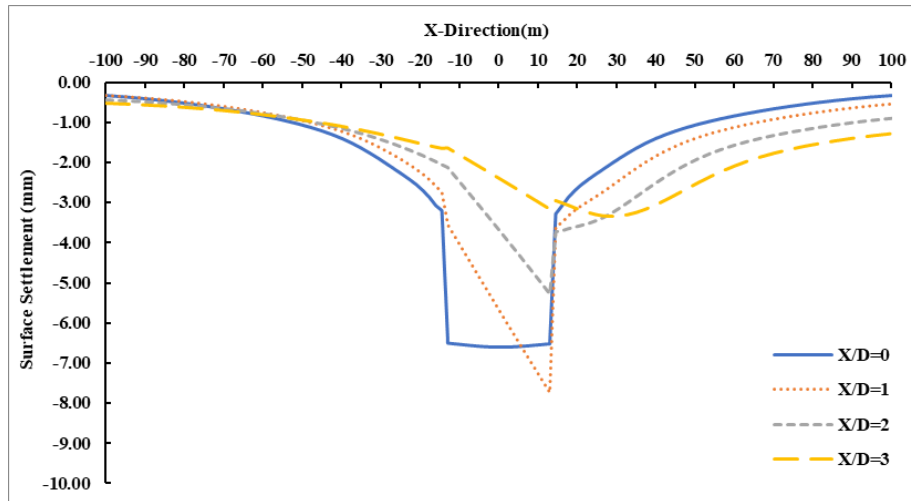


Figure 5: Variation in surface settlement with respect to X/D for piles with a diameter of 1.2m and Z/D=0.5.

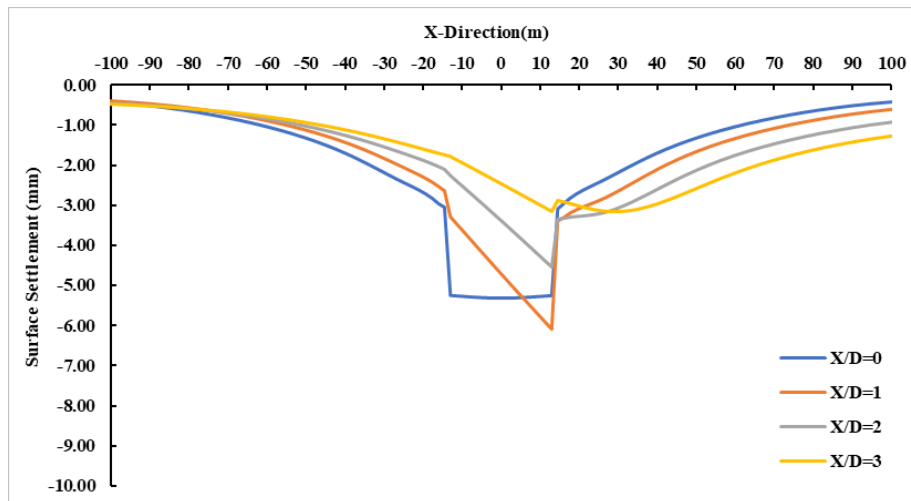


Figure 6: Variation in surface settlement with respect to X/D for piles with a diameter of 1.2m and Z/D=1.

3.2. Effect of Tunnel on the Piles Settlement

In this section, the effect of tunneling on the settlement of piles is given in Figures 7 and 8, respectively, for piles with diameters of 0.8 and 1.2 meters. It is evident that a decrease in settlements resulted from an increase in pile diameter and Z/D ratio. Increasing the X/D value in both Z/D values causes the settlement amount in the piles to decrease, but this decrease is greater in the piles on the left side of the foundation axis, that is in the piles that are farther from the tunnel. Increasing the X/D value increases the amount of differential settlement, and X/D = 1 is the critical value in terms of it.

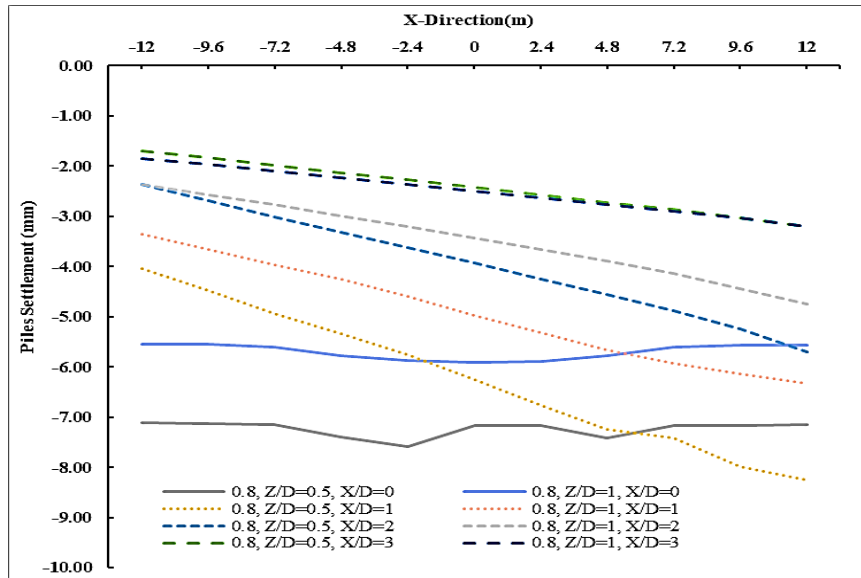


Figure 7: Piles settlement changes for pile with $d=0.8\text{m}$.

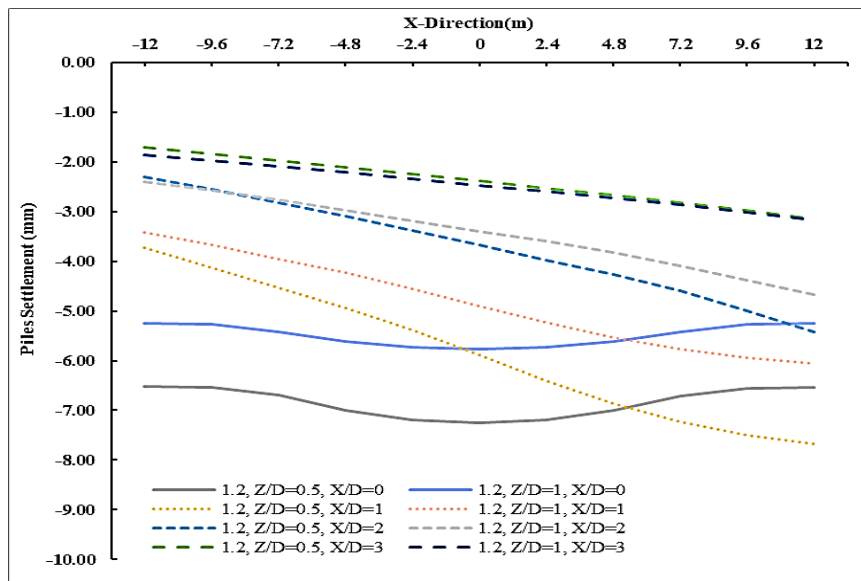


Figure 8: Piles settlement changes for pile with $d=1.2\text{m}$.

3.3. Effect of Tunnel on the Piles Bending Moment

A comparison of figures 9 and 10 reveals a significant drop in moment values as the pile diameter increases. The bending moment slightly decreases as the tunnel's horizontal location moves away from the pile. Due to the tunnel's new location in the +x direction, the pile on the left is the one that is most impacted. It's possible that the influence zones are too responsible. The effects are amplified when the tunnel is situated within the influence zone. The tunnel's effect decreases with increasing distance within the influence zone.

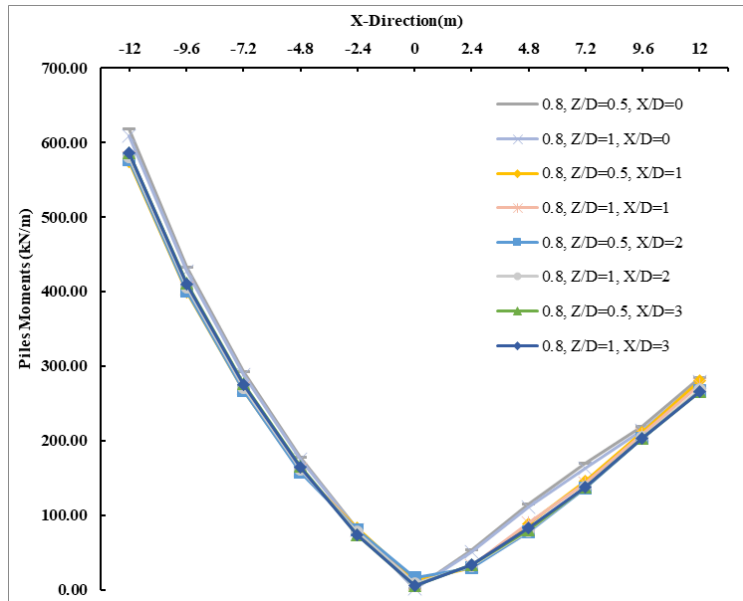


Figure 9: Bending moment variation in piles for $d = 0.8\text{m}$.

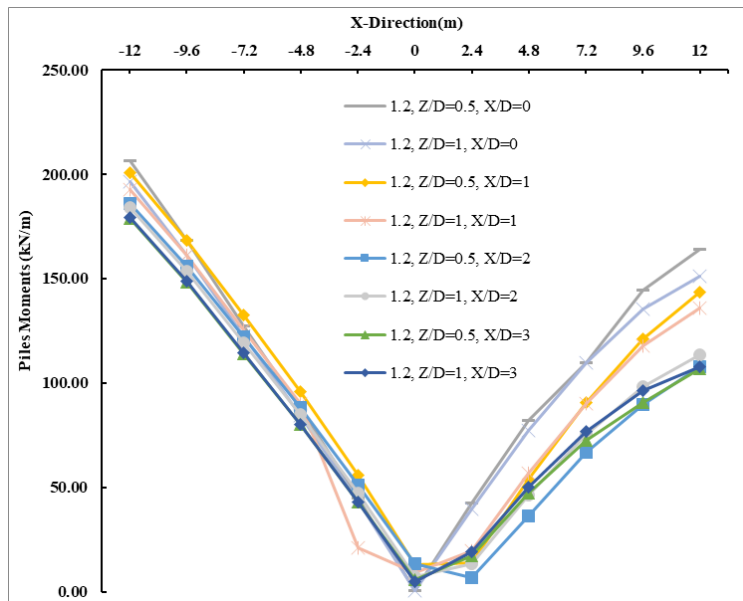


Figure 10: Bending moment variation in piles for $d = 1\text{m}$.

3.4. Effect of Tunnel Location on Tunnel Settlement and Axial Force

As Figure 11 illustrates, the amount of settlement in the tunnel is not significantly affected by increasing the diameter of the pile or deepening the tunnel; instead, the amount of settlement varies when the tunnel's horizontal position is altered and increases when it approaches the foundation.

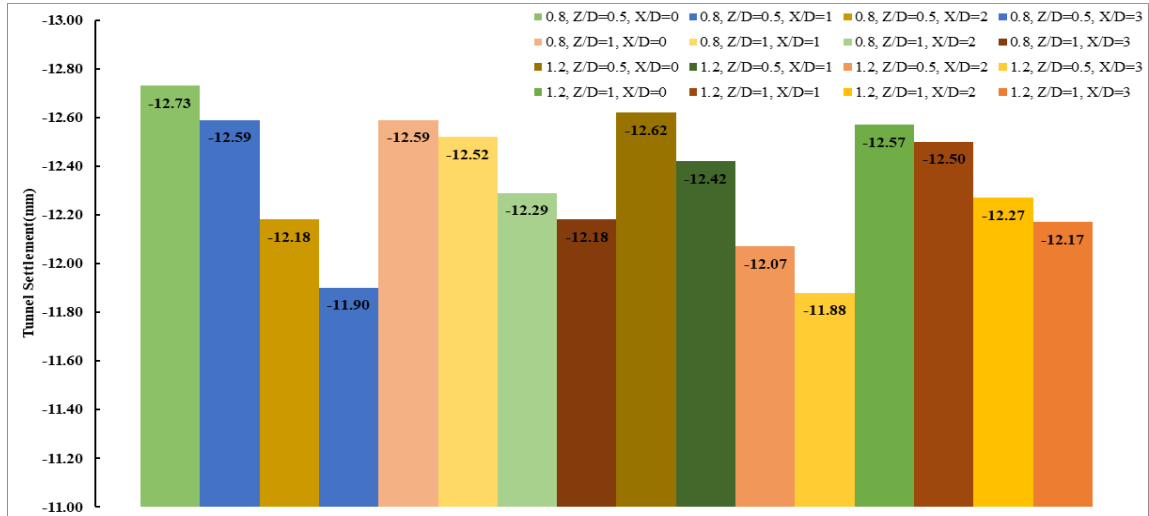


Figure 11: Effect of pile diameter and tunnel location on tunnel settlement.

Figure 12 shows the axial forces acting on the tunnel. The data indicates that there is no significant effect on the amount of axial force when the pile diameter is increased or the tunnel's horizontal position is altered. However, the axial force changes and increases as predicted when Z/D increases.

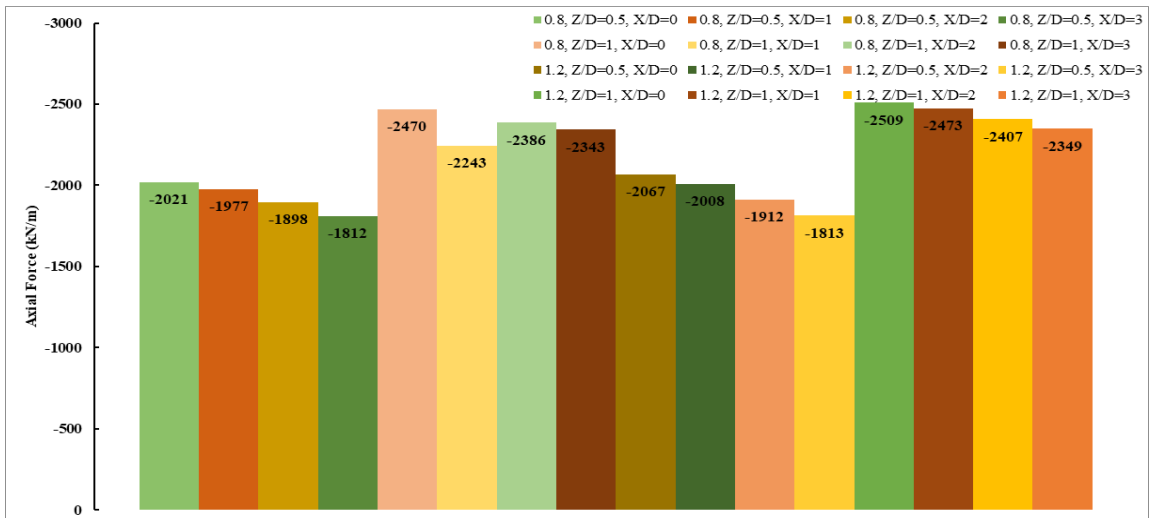


Figure 12: Effect of pile diameter and tunnel location on tunnel axial force.

4. CONCLUSIONS

The location of the tunnel is crucial when taking the influence zones into account. The main location parameters, which are also the main parameters in this study, are its depth and distance from the foundation center. The results of 16 analyses carried out in this study to investigate how tunneling and tunnel location affected the piled foundation system's settlement are presented below:

- It can be stated that as the tunnel is positioned farther in the x direction from the foundation center axis, the surface total settlement values decrease, and the differential settlements increase.
- Increasing the pile diameter and Z/D ratio led to a reduction in pile settlements.
- The amount of settlement in the piles decreases when the X/D value in both Z/D values is increased; however, the amount of settlement decrease is larger in the piles that are farther from the tunnel, or on the left side of the foundation axis.
- As the horizontal location of the tunnel moves away from the pile, the bending moment of the pile slightly decreases. The tunnel's effect decreases with increasing distance within the influence zone.
- Increasing the diameter of the pile or deepening the tunnel has no appreciable effect on the amount of tunnel settlement.
- The amount of tunnel settlement increases as the tunnel approaches the foundation and varies when the tunnel's horizontal position is changed.
- Increasing the pile diameter or changing the horizontal position of the tunnel has no noticeable impact on the tunnel axial force.
- When Z/D increases, the tunnel axial force changes and increases.
- One of the main issues in metropolitan areas these days is traffic congestion. Subway and underpass tunnels have proven to be a successful solution to these issues.
- In addition to estimating the possible deformations that may occur in the structures during the construction stages, any deformations should be periodically monitored by taking measurements at relevant locations inside the tunnel and on the structures using instrumental observations.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

There is no conflict of interest among the authors.

CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

H.Z.A.: Conceptualization, methodology, software, validation, formal analysis, investigation, resources, writing—original draft preparation.

O.Y.: Validation, investigation, writing—review and editing.

REFERENCES

- Dalgıç, S., Turgut, M., Kuşku, İ., Coşkun, Ç., & Coşgun, T. (2009). İstanbul'un Avrupa Yakasındaki Zemin ve Kaya Koşullarının Bina Temellerine Etkisi. *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, 8(2), 47-70.
- Deshmukh, R., & Patil, P. (2020). Effect of Tunnel Construction on the Settlement of Existing Pile-Supported Superstructure. In *Smart Cities—Opportunities and Challenges: Select Proceedings of ICSC 2019*, (pp. 555-270).
- El Houari, N., Taleb, O., Hamzaoui, F., & Bachir, E. (2022). Analysis of Pile Tunnel Interaction. *International Journal of Advanced Studies in Computer Science & Engineering*, 11(11).
- Ertürk, Z. (2015). İstanbul Avrupa Yakası Güneyindeki Zeminlerin Geotekniği. (Doctoral Dissertation, İstanbul Kültür Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı/Geoteknik Bilim Dalı).
- Jongpradist, P., Detkhong, T., and Youwai, S. (2012). Numerical Simulations of Geotechnical Works in Bangkok Subsoil Using Advanced Soil Models Available In Plaxis And Through User-Defined Model. *PLAXIS Professional*.
- Kumar, R. (2022). Tunnel Pile Interaction & Settlement Analysis Of Piles Under Influence Of Tunnel Using Plaxis 2d. Master Of Technology, Department Of Civil Engineering Delhi Technological University (DTU).
- Raja, M. K., Premalatha, K., & Hariswaran, M. S. (2015). Influence of tunneling on adjacent existing pile foundation. *Int J Eng Res And4* , 08, 477-483.
- Rezala. (2013). Büyükçekmece Gölü Yakınında Gelişen Kütlesel Bir Kayma Hareketinin Analizi / Analysis of A Sliding Mass Movement Developed Near The Buyukcekmece Lake. İstanbul Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Salim, N. M., & Lafta, S. J. (2020). The Effect of Group of Piles on Existing Tunnel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737.
- Shabna, P. S., & Sankar, N. (2016). Numerical analysis of shallow tunnels in soft ground using Plaxis2D. *Int J Sci Eng Res*, 7(4), 978.
- Swetha, B., Sangeetha, S., & Hari Krishna, P. (2022). Numerical Prediction of Tunneling Induced Surface Settlement of a Pile Group. In *Recent Trends in Construction Technology and Management: Select Proceedings of ACTM 2021*, 673-683.
- Tezcan, S. S., Kaya, E., Bal, I. E., & Özdemir, Z. . (2002). Seismic amplification at Avcılar, Istanbul. *Engineering structures*, 24(5), 661-667.

Determination and Speciation of Cd(II) and Pb(II) Ions Using Magnetic Solid Phase Extraction By Flame Atomic Absorption Spectroscopy

Nurdan Kurnaz Yetim¹, Elvan Hasanoğlu Özkan², Nihat Akkurt^{1*}, Cemile Özcan¹

¹Department of Chemistry, Faculty of Arts and Sciences, Kırklareli University, Kırklareli, TÜRKİYE

² Department of Chemistry, Faculty of Sciences, Gazi University, Ankara, TÜRKİYE

Received: 23.10.2023, Accepted: 09.12.2023, Published: 31.12.2023

ABSTRACT

In this study, Pb(II) and Cd(II) ions were determined by Fe₃O₄@G2/Napht magnetic dendrimers using the solid-phase extraction (SPE) method by flame atomic absorption spectrophotometer (FAAS). The morphological and chemical properties of magnetic dendrimers were investigated using Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy and transmission electron microscopy (TEM) techniques. The magnetic characteristics of the ferromagnetic features of the magnetic nanocomposites were validated by vibrating sample magnetometry (VSM). The heavy metal ion recovery was assessed via flame atomic adsorption spectroscopy (FAAS). To ascertain the ideal adsorption system conditions, the effects of various parameters, including pH, adsorbent dose, adsorbent time, eluent type and amount, etc., were examined. Optimum conditions for heavy metal recovery using Fe₃O₄@G2/Napht magnetic dendrimer were determined as pH 6.5, 1M HNO₃ and 100 mg for Pb(II) and pH 6.5, 1 M HNO₃ and 100 mg for Cd(II). The novel material of Fe₃O₄@G2/Napht magnetic dendrimer for separation and pre-concentration of Pb(II) and Cd(II) was used to natural water.

Keywords: Magnetic dendrimers; SPE; FAAS; Cd(II); Pb(II)

Alevli Atomik Absorpsiyon Spektroskopisi ile Manyetik Katı Faz Ekstraksiyonu Kullanılarak Cd(II) ve Pb(II) İyonlarının Tayini ve Türlendirilmesi

ÖZ

Bu çalışmada, Pb(II) ve Cd(II) iyonları Fe₃O₄@G2/Napht manyetik dendrimerler ile katı faz ekstraksiyon (SPE) yöntemi kullanılarak alevli atomik absorpsiyon spektrofotometresi (AAS) ile tayin edilmiştir. Manyetik dendrimerlerin morfolojik ve kimyasal özellikleri Fourier Transform Infrared (FTIR) spektroskopisi ve transmisyon elektron mikroskobu (TEM) teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Manyetik nanokompozitlerin ferromanyetik özelliklerinin manyetik karakteristikleri titreşimli numune manyetometrisi (VSM) ile doğrulanmıştır. Ağır metal iyonlarının geri kazanımı alevli atomik adsorpsiyon spektroskopisi (AAS) ile değerlendirilmiştir. İdeal adsorpsiyon sistemi koşullarını belirlemek için pH, adsorban dozu, adsorban süresi, eluent türü ve miktarı gibi çeşitli parametrelerin etkileri incelenmiştir. Fe₃O₄@G2/Napht manyetik dendrimer kullanılarak ağır metal geri kazanımı için optimum koşullar Pb(II) için pH 6,5, 1M HNO₃ ve 100 mg, Cd(II) için pH 6,5, 1 M HNO₃ ve 100 mg olarak belirlenmiştir. Pb(II) ve Cd(II)'nin ayrılması ve ön konsantrasyonu için Fe₃O₄@G2/Napht manyetik dendrimerden oluşan yeni malzeme doğal suda kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Manyetik dendrimerler; SPE; AAS; Cd(II); Pb(II)

1. INTRODUCTION

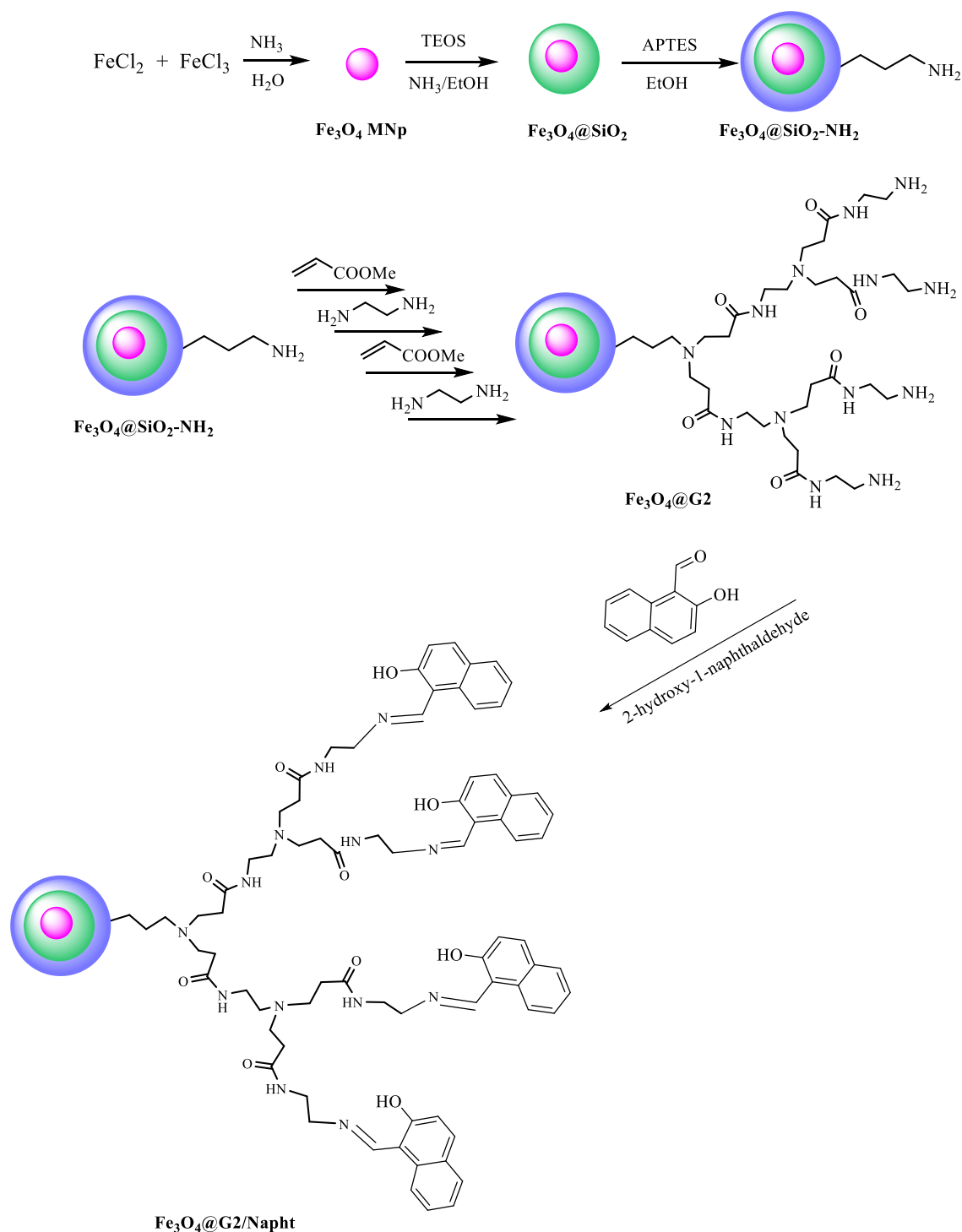
Wastewater contains a large number of toxic heavy metal ions that are extremely harmful to human health. Since it's a useful tool for identifying and tracking harmful compounds in environmental samples, scientists frequently find that determining trace amounts of heavy metals is a significant task. Cadmium is one of the heavy metals in the environment that requires close monitoring due to its sharp rise in concentrations. Being a known carcinogen, lead is among the most hazardous substances to human health. [1-6]. When they build up in different tissues, trace amounts of the metals cadmium and lead can negatively affect the gastrointestinal system, the heart, the blood, the kidneys, and the reproductive system in humans and other living things [7]. Analytical techniques for heavy metal analysis have been developed, including electrothermal atomic absorption spectrometry (ETAAS) [8], flame atomic absorption spectrometry (FAAS) [9-12], inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) [13-14], and inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) [8,14]. Comparing these techniques, it is discovered that FAAS is the analytical technique that is most frequently employed due to its broad linear range, affordability, high accuracy, selectivity, low detection limit, speed, precision, and sensitivity [15]. Nevertheless, because the low detection levels in the materials under examination might exceed the FAAS instrument's detection limit, interference effects from complex matrices could preclude direct heavy metal analysis by this instrument during the analysis of trace heavy metal ions. Thus, before analyzing trace heavy metals using FAAS, a highly accurate and sensitive separation and enrichment technique must be developed.

There are several methods for extracting and preconcentrating heavy metals from natural matrices, such as ion exchange [16], co-precipitation [17], coagulation [18], chemical precipitation, cloud point extraction [19], and liquid-liquid extraction (LLE) [19], reverse osmosis [20], membrane filtration [21], coagulation [18], co-precipitation [17], electrochemical precipitation [22] and SPE have been developed. Among the mentioned methods, SPE is the most widely used method for the pre-concentration of heavy metal ions from environmental samples due to its ease, speed, low cost, and minimal reagent consumption [23].

Dendrimers are one of the materials used as adsorbents in SPE. Dendrimers are good candidates for surface modifications of metal nanoparticles because they can act as structurally and chemically well-defined templates that provide good stabilization. The dendrimer cavities are suitable for transferring the molecules or nanoparticles to any medium [24,25]. The non-covalent interaction between guest and host is effective in such a transfer. By imparting magnetic properties to dendrimers, it is possible to easily remove them from the solution medium [26-28].

In our work, new Fe₃O₄ core magnetic dendrimers were synthesized for the enrichment of Cd (II) and Pb(II), and their structures were characterized by various spectroscopic methods such as FTIR, TEM, and VSM [29-32] (Scheme 1). The applications of adsorbents based on magnetic dendrimer-based nanostructures that we use have unique properties in SPE techniques. Optimum parameters such as pH, eluent

type and concentration, amount of adsorbent, and time, which are important in the enrichment process for SPE of Cd(II) and Pb(II) were determined by flame atomic absorption spectroscopy and optimum conditions were applied to real samples.



Scheme 1: Synthesis of Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{G1}$, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{G2}$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{G2/Napht}$

2. Materials and Methods

2.1. Synthesis of magnetic $Fe_3O_4@G2/Napht$ magnetic dendrimers

Synthesis of Fe_3O_4 , $Fe_3O_4@SiO_2$, $Fe_3O_4@G1$ and $Fe_3O_4@G2$ nanoparticles were synthesized by Kurnaz Yetim et al., as shown in Scheme 1 [29-32]. To synthesized $Fe_3O_4@G2/Napht$; 7.5 g $Fe_3O_4@G2$ and 15 g 2-hydroxy-1-naphtaldehyde in 125 mL dry ethanol dispersed for 30 min. Then, the mixture was heated under reflux for 24 h. The final compound was collected from solution using a magnet and the compound washed with ethanol twice. The final product was dried in a vacuum oven 40 °C for 24 h (Scheme 1).

2.2. Magnetic solid-phase extraction methodology

50 mg MNPs, 10 mL ultrapure water, 0.25 mL (50 ppm) Pb(II) metal ion solution and 1 mL pH:6 buffer were added into 50 mL test tubes. The total volume was made upto 25 mL with ultrapure water. The samples were then kept in an ultrasonic bath for 10 minutes and centrifuged at 9000 rpm for 10 min. The liquid phase was saved for analysis and 5 mL of the selected acid solution was added to the solid-phase. The samples were first kept in an ultrasonic bath for 10 min and then centrifuged at 9000 rpm for 10 min. The concentration of metal ions remaining in the liquid phase was analyzed by FAAS. In the eluent type optimization step, 0.1-3 M HNO_3 and 1 M HCl acid solutions were used. In pH optimization, pH 5-8 values were used. The buffers used were pH:5.0 (NaH_2PO_4/H_3PO_4); pH: 6 (Na_2HPO_4/NaH_2PO_4); pH: 7.0-8.0 (NaH_2PO_4/Na_2HPO_4). In adsorbent amount optimization, 50-200 mg $Fe_3O_4@G2/Napht$ was used. In eluent volume optimization, 5-30 mL of ultrapure water was used. Finally, the optimum time was studied by keeping the samples in an ultrasonic bath for 5-60 min [33,34].

3. Result and Discussion

3.1. Characterization of magnetic dendrimers

The results of FTIR, XRD, TGA, VSM and different elemental analysis methods of $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{G}2$ magnetic dendrimer were presented in our previous studies [29,30]. In this study, the characterization of $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{G}2/\text{Napht}$ nanocomposites was discussed. Figure 1 presents the FTIR spectrum of $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{G}2/\text{Napht}$ nanocomposites. When the FTIR spectrum for Fe_3O_4 MNP was analyzed, the bands observed at about 583 and 456 cm^{-1} were predicted to belong to the intrinsic stress vibrations of the metal in the tetrahedral region ($\text{Fe}_{\text{tetra}}\leftrightarrow\text{O}$) and octahedral region ($\text{Fe}_{\text{octa}}\leftrightarrow\text{O}$) [35]. In the FTIR spectrum of $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{G}2$ dendrimer, the band at 1524 cm^{-1} was attributed to N-H groups in PAMAM dendrimer and the broad absorption band at 3300 cm^{-1} was attributed to O-H stretching vibration of hydroxy group at $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{G}2/\text{Napht}$ and 3073 cm^{-1} peak is belong to aromatic C-H at Napht. The bands at 2933 and 2887 cm^{-1} were attributed to C-H symmetric and asymmetric stretching vibrations of alkane groups, respectively [29].

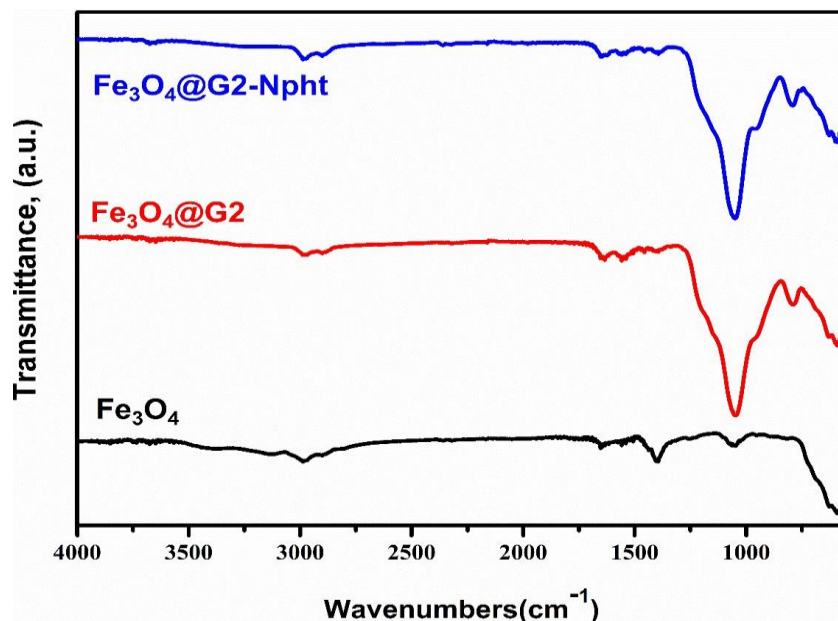


Figure 1: FTIR spectrume of Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{G}2$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{G}2/\text{Napht}$ magnetic nanoparticles

TEM images of Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{G}2$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{G}2/\text{Napht}$ magnetic nanoparticles are presented in Figure 2. When TEM images of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles are examined, it is seen that iron nanoparticles are nanosized. Due to their high magnetic properties, the particles are found together. It is clearly seen from the TEM image that the magnetic nanoparticles coated with PAMAM dendrimers have a typical core-shell structure (magnetic core is dark and silica shell is light) (Figure 2b). As seen in the TEM images, it was discovered that the size of the magnetic particles increased as the coating process progressed.

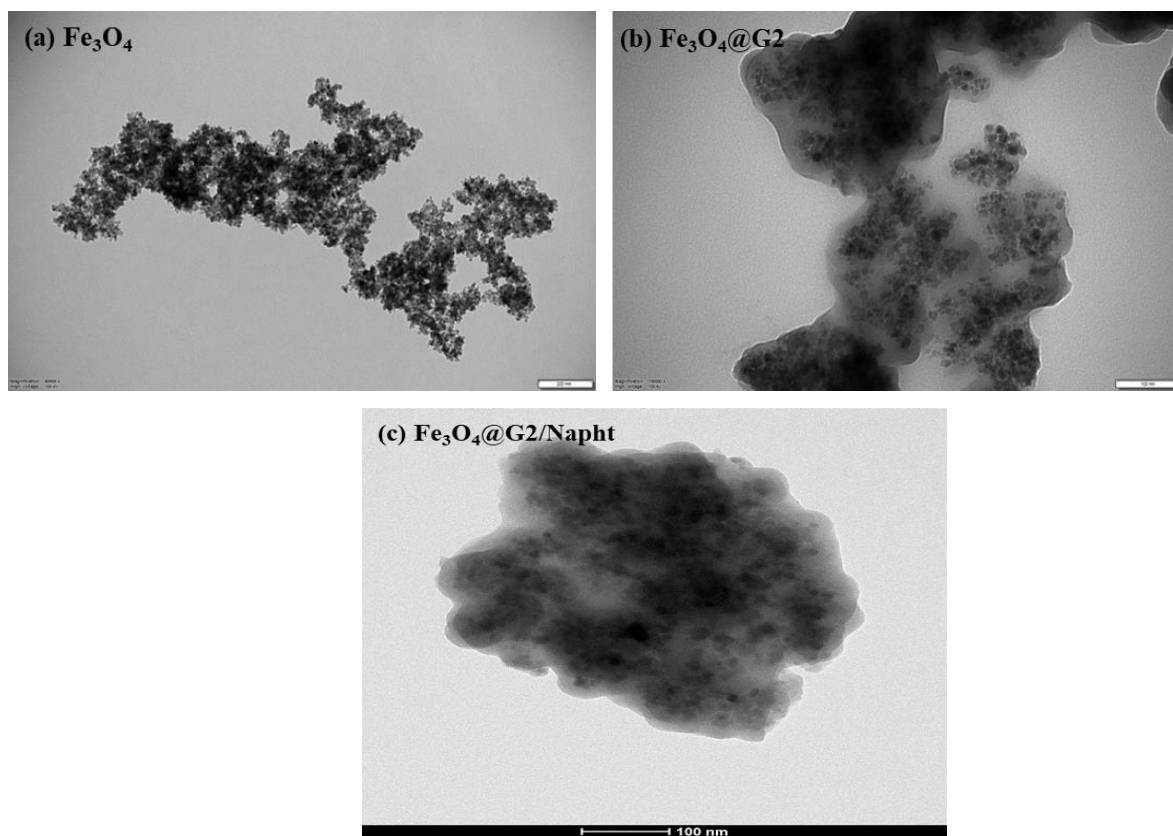


Figure 2: TEM images of Fe₃O₄ (a), Fe₃O₄@G2 (b) and Fe₃O₄@G2/Napht (c)

The magnetization curves of Fe₃O₄, Fe₃O₄@G2 and Fe₃O₄@G2/Napht magnetic nanoparticles are presented in Figure 3. When the magnetization curve of Fe₃O₄ nanoparticles was examined, it was determined that their saturated magnetization value was 63.7 emu/g. The saturated magnetization value of Fe₃O₄@G2 dendrimer obtained by attaching PAMAM dendrimers to MNPs was found to be 34.7 emu/g, while the saturated magnetization value of Fe₃O₄@G2/Napht magnetic nanoparticle obtained by attaching 2-hydroxy-1-naphtaldehyde to magnetic dendrimers was 10.8 emu/g.

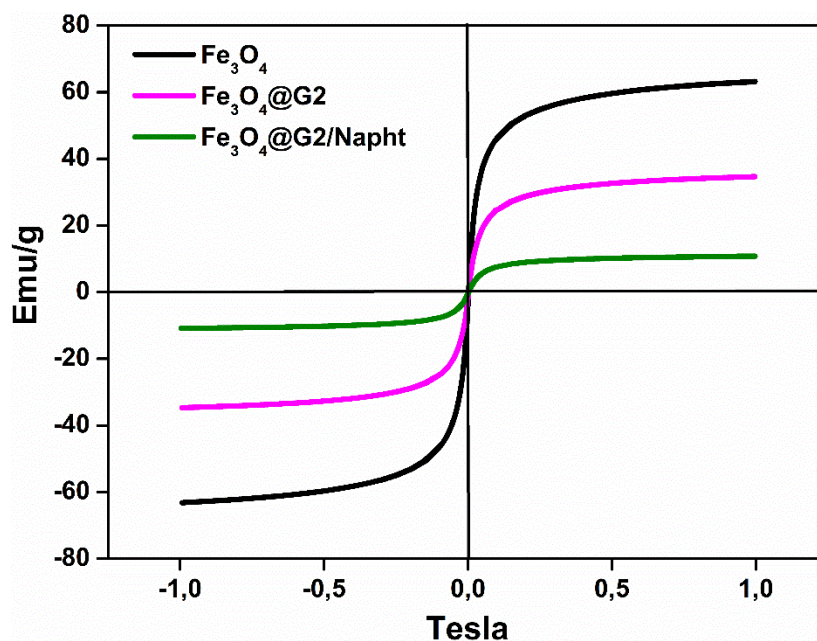


Figure 3: Hysteresis curves of Fe₃O₄, Fe₃O₄@G2 and Fe₃O₄@G2/Napht magnetic nanoparticles

3.2. Removal of heavy metals (Cd(II), Pb(II))

3.2.1. Effect of pH

In adsorption-separation investigations, the main factor examined is the impact of pH on the recovery of analyte ions. In order for trace amounts of heavy metal ions to be adsorbed onto the freshly manufactured adsorbent, pH optimization is essential. Direct effects on the solubility and chemical forms of metal ions are caused by the solution's acidity or alkalinity. In an acidic environment, metal ions usually exist as free, hydrated species, but they can also precipitate form hydroxide complexes or in a basic solution. In order to find the ideal pH, we created model solutions and used buffer solutions to investigate the pH range of 5 to 8. The results of three parallel runs were averaged to determine recovery values. Figure 4 displays the pH and recovery values. Pb(II) and Cd(II) were both quantitatively recovered at pH 6.5.

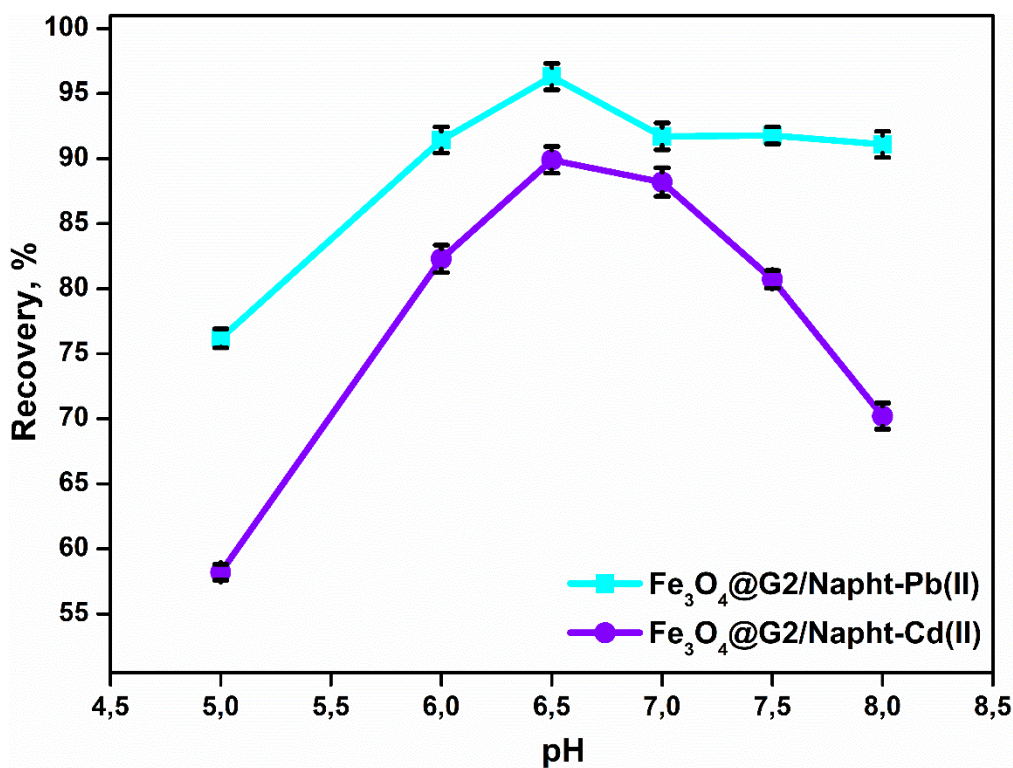


Figure 4: Effect of pH on recovery values

3.2.2. Eluent Type and Concentration

The kind and concentration of the eluent is another important factor affecting the recovery outcomes. The properties of the analytes, the solid-phase material, the intended analytical method, and the eluent's capacity to efficiently release the target analytes from the solid-phase while minimizing interference from other sample components are all taken into consideration when selecting the elution solution in SPE. When choosing the eluent, factors including selectivity, solubility, and compatibility with downstream analysis procedures should be taken into account.

Different concentrations of HNO₃ (0.1-3.0 mol L⁻¹) and 1 M HCl acid solution were used for the elution of trace amounts of Pb(II) and Cd(II) adsorbed on magnetic dendrimers. The results are given in Figure 5. In the graph; the best recovery of Pb(II) metal ion was found to be in 1 M HNO₃ with 98.27 % efficiency, while the best recovery of Cd(II) metal ion was found to be in 1 M HNO₃ with 91.35 % efficiency and these eluents were used in all subsequent studies.

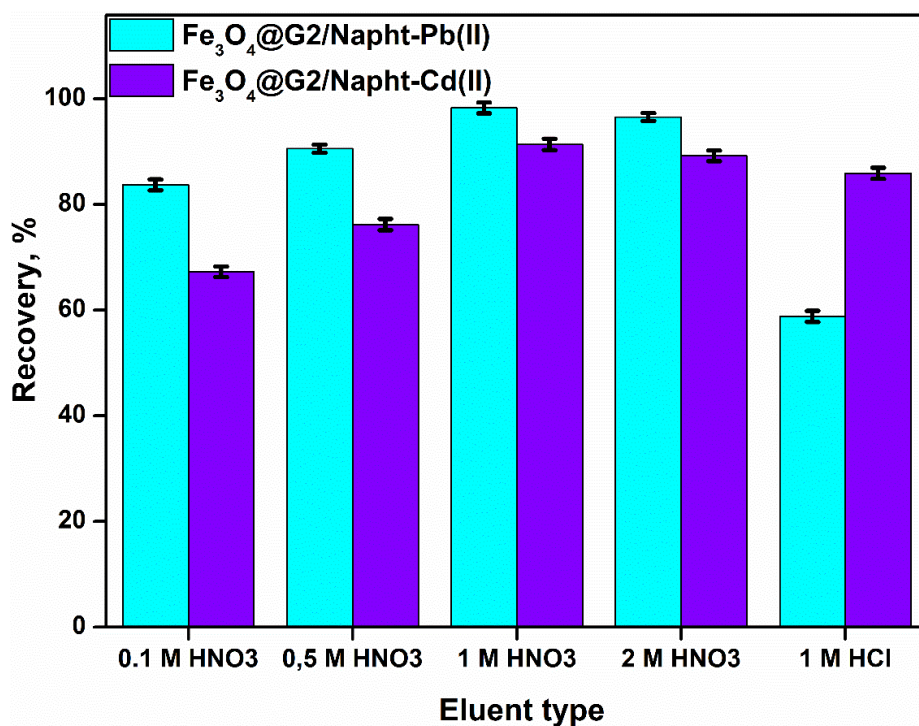


Figure 5: Effect of eluent type and concentration on recovery values

3.2.3. The Effect of Magnetic Dendrimer Amount

Different amounts of magnetic dendrimer used as adsorbent for the recovery of lead and cadmium were investigated. When choosing the ideal amount of adsorbent for SPE, a number of factors must be taken into account, including the analyte's concentration, volume of sample, capacity and properties. To determine the ideal ratio between maximizing adsorption and minimizing adsorbent waste, optimization experiments are also required. The amount of adsorbent was tested in the range of 25-200 mg and the results are given in Figure 6. According to the results obtained, all amounts used gave quantitative recoveries of Pb(II) and Cd(II). Figure 6 shows that the best recovery of Pb(II) metal ion was determined at 100 mg adsorbent with 99.58 % efficiency, while the best recovery of Cd(II) metal ion was determined at 100 mg adsorbent with 95.85 % efficiency.

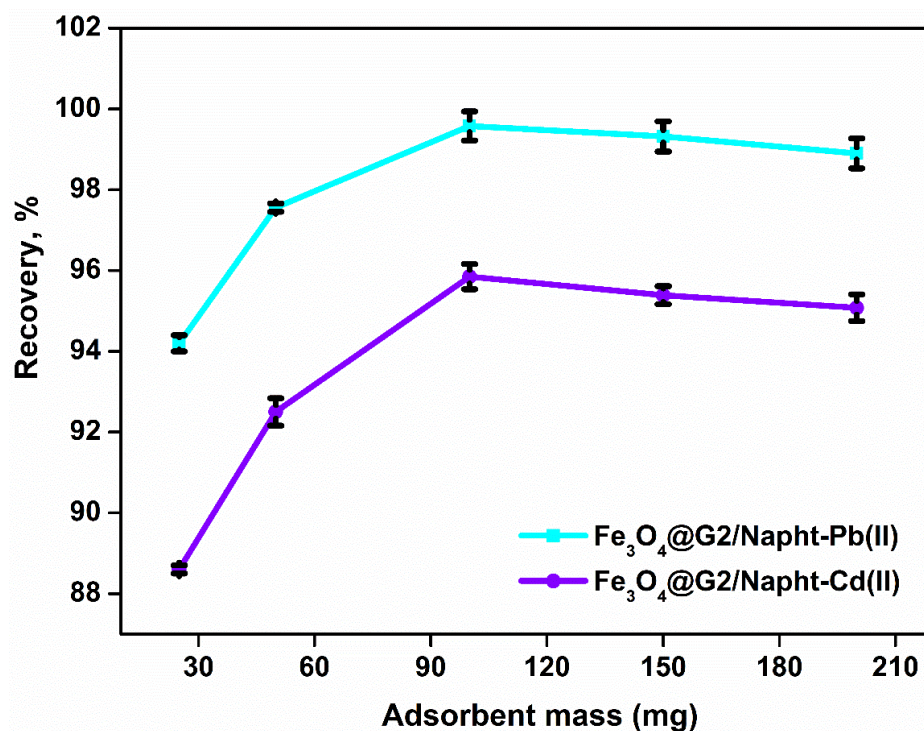


Figure 6: Effect of magnetic nanoparticles on recovery values

3.2.4. The Effect of Solution Volume

Solution volume optimizations were performed to obtain the best recovery values with minimum solution volume. The effect of sample volume on Pb(II) and Cd(II) recoveries on magnetic dendrimers was investigated in the range of 5-30 mL sample volume. Figure 7 shows that the best recovery of Pb(II) was found to be at 10 mL with 99.9 % efficiency and for Cd(II) at 10 mL with 95.73 % efficiency.

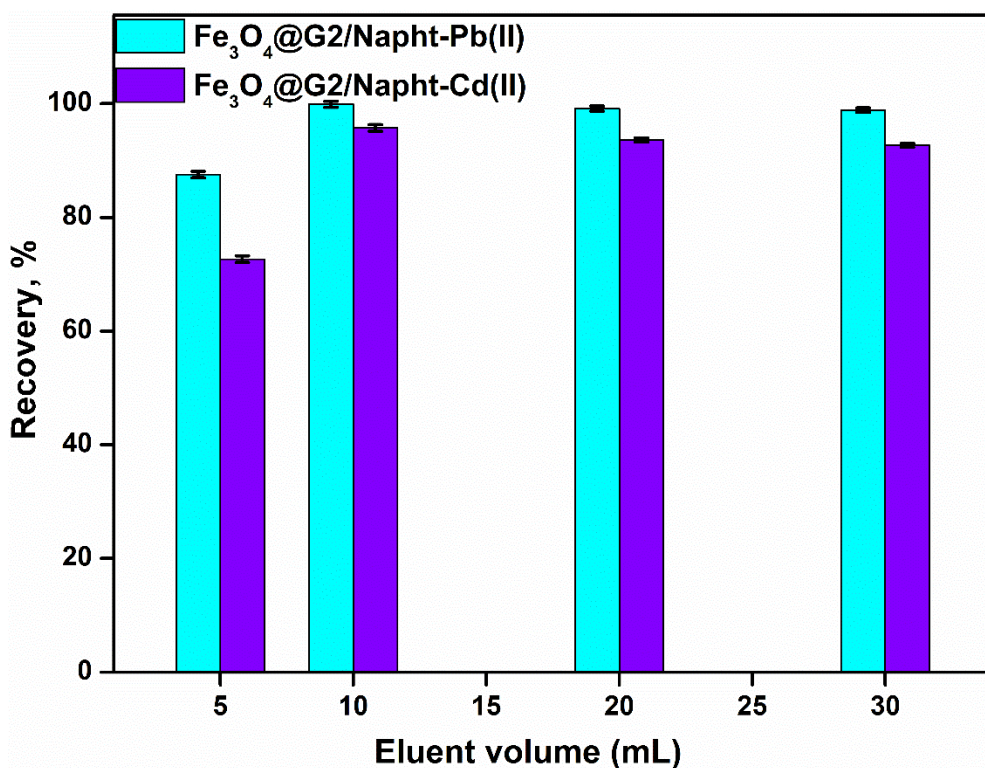


Figure 7: Effect of sample volume on recovery values

3.2.5. Effect of Extraction Time

The characteristics of the analytes, the solid phase, and the makeup of the sample matrix all affect how long the adsorption process takes to complete and how many analytes are absorbed by the solid phase. For the adsorption of analyte ions onto magnetic dendrimers, stirring in an ultrasonic bath was applied. The effect of sonication time on Cd(II) and Pb(II) recovery was investigated in the range of 5-60 min and presented in Figure 8. As shown in Figure 8, 10 min was sufficient for the recoveries. 10 min was determined as the optimum time for extraction as there was no further increase in recoveries at the end of the min. During this time, the best Pb(II) metal ion recovery was realized with 99.8 % yield, while for Cd(II) 96.8 % yield was observed.

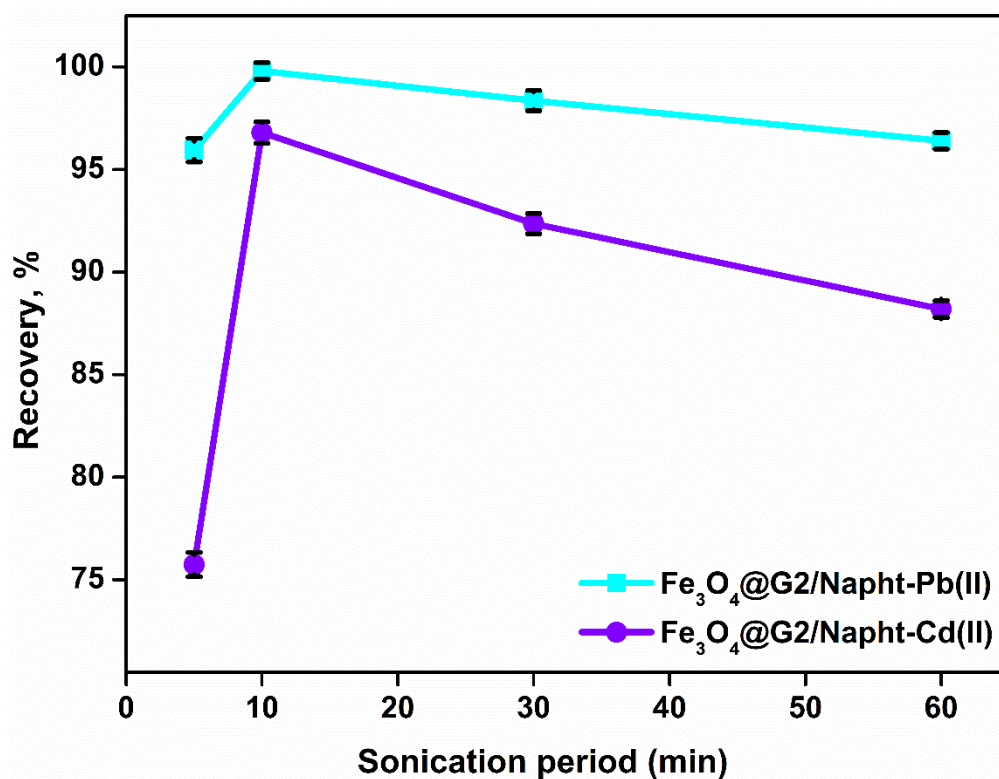


Figure 8: Effect of sonication time on removal of Cd(II) and Pb(II).

3.2.6. Effect of foreign ions on recovery

The interference of foreign ions is a major problem in the detection of trace levels of certain analytes. In this study, the effect of matrix ions of real samples on the recovery of Pb(II) and Cd(II) in wastewater by magnetic dendrimers was investigated and given in Table 1.

Table 1. Effect of other ions on the recovery efficiency of Pb and Cd ions (matrix)

Ions	Added as	Concentration (mg/L)	Recovery for Pb, %	Recovery for Cd, %
K ⁺	KCl	1000	99.9 ± 0.1	98.9 ± 0.6
Na ⁺	NaCl	100	102 ± 3	98.4 ± 0.2
Ca ²⁺	CaCl ₂	25	100 ± 3	98.8 ± 0.9
Mg ²⁺	Mg(NO ₃) ₂	5	102 ± 2	100 ± 3
Zn ²⁺	Zn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	5	99.3 ± 4	99.2 ± 0.6
Cu ²⁺	Cu(NO ₃) ₂	5	103 ± 3	98.9 ± 0.9
Mn ²⁺	Mn(NO ₃) ₂	5	99.2 ± 0.9	97.8 ± 0.5
Cr ³⁺	Zn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	1	98.9 ± 0.5	98.5 ± 0.3
Fe ³⁺	Fe(NO ₃) ₃ 9H ₂ O	5	99.3 ± 2	99.2 ± 0.2

No interference effect of the ions given in Table 1 was observed in the model solutions containing 0.5 mg/L Pb²⁺ and Cd²⁺ ions. In addition, optimum conditions were applied to real samples and verified by standard addition method.

Table 2. Application of the method for water samples using standard addition method.

Sample	Pb (II)			Cd (II)		
	Added, mg/L	Found mg/L	Recovery %	Added, mg/L	Found mg/L	Recovery %
Tap water	0	ND	-	0	ND	-
	0.5	0.48 ± 0.009	95	0.5	0.49 ± 0.006	98
	1.0	0.98 ± 0.006	98	1.0	0.99 ± 0.006	99
River water	0	ND	-	0	ND	-
	0.5	0.48 ± 0.011	96	0.5	0.51 ± 0.006	101
	1.0	0.98 ± 0.007	98	1.0	0.99 ± 0.006	99

With the method applied to tap water and river water samples as real samples, 4-fold and 1.5-fold enrichment was achieved in Pb(II) and Cd(II) ions, respectively. We suggest that the used magnetic nanomaterial will contribute to the waste removal procedure in battery factories where lead metal is used intensively.

4. CONCLUSION

A new magnetic adsorbent, Fe₃O₄@G2/Napht nanoparticle, was synthesized and characterized. The optimum conditions for pH, eluent type, sonication time, etc. which are important parameters in solid-phase extraction for Pb (II) and Cd (II) were determined with the synthesized magnetic nanoparticle. An effective, fast, and easy solid-phase extraction and precipitation process was carried out to separate and enrich Pb and Cd in natural water samples and analyzed by FAAS. Maximum recovery of 99.8% and 96.8% was achieved for magnetic nanoparticles Pb (II) and Cd (II), respectively. It can be suggested that our study is much more effective in lead recovery and can be used for recovery in wastewater.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

There is no conflict of interest among the authors.

ACKNOWLEDGEMENT

This work supported by Kırklareli University Scientific Research Fund with project number KLÜBAP-236.

CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

F.A.: N. KURNAZ YETİM designed the experiments and contributed to the interpretation of the results, writing-

original draft preparation.

S.A.: E. HASANOĞLU ÖZKAN performed the FAAS experiments, formal analysis, visualization, writing-review & editing, validation, and resources.

T.A.: N. AKKURT carried out the experiments depending on synthesis and written original draft preparation.

F.A.: C. OZCAN carried out and assessment the FAAS experiments.

Each author contributed to the final manuscript and discussed the findings.

REFERENCES

- [1] A. Soegianto, H.I. Wahyuni, B. Yulianto, and L.A. Manaf, "Health risk assessment of metals in mud crab (*Scylla serrata*) from the East Java Estuaries of Indonesia," *Environ Toxicol Pharmacol.*, vol. 90, pp. 103810, Feb. 2022. doi: 10.1016/j.etap.2022.103810.
- [2] F. Nikfar, S. Sabzalipour, A. Gholami, and A. Nazarpour, "Carcinogenic risk assessment, health endpoint and source identification of heavy metals in Mahshahr, Iran," *Toxin Reviews*, vol. 42:1, pp. 132-145, 2023. doi: 10.1080/15569543.2021.2023576
- [3] I. Gul, M. Manzoor, N. Hashim, G. M. Shah, S. P. Tariq Waani, M. Shahid, V. Antoniadis, J. Rinklebe, and M. Arshad, "Challenges in microbially and chelate-assisted phytoextraction of cadmium and lead - A review," *Environ Pollut.*, vol. 287, pp.117667, Oct. 2021. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117667.
- [4] N. Alahmadi, "Recent progress in photocatalytic removal of environmental pollution hazards in water using nanostructured materials," *Separations.*, vol. 9, pp. 264, 2022. <https://doi.org/10.3390/separations9100264>
- [5] A. Widyantoro, F. Binazir Maziya, and A. Umar Abidin, "Exposure analysis of lead (Pb) and chromium (Cr) in workplace workshop PT. X," *Gac Sanit.* vol. 35(S2), pp. S450-S454, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2021.07.023>
- [6] R. Jagadeep, R.V. Vignesh, P. Sumanth, V. Sarathi, and M. Govindaraju, "Fabrication of fly-ash based tiles using liquid phase sintering technology," *Materials Today-Proceedings.*, vol. 46, pp.7224-7229, Sep. 2021. DOI10.1016/j.matpr.2020.12.348
- [7] A. A. Gouda, and W. A. Zordok, "Solid-phase extraction method for preconcentration of cadmium and lead in environmental samples using multiwalled carbon nanotubes," *Turk J Chem.*, vol. 42, pp. 1018-1031, 2018. doi:10.3906/kim-1711-90
- [8] O. Acar, "Evaluation of cadmium, lead, copper, iron and zinc in Turkish dietary vegetable oils and olives using electrothermal and flame atomic absorption spectrometry," *Grasas Y Aceites.*, vol. 63:4, pp. 383-393, Oct.-Dec. 2012. doi10.3989/gya.047512
- [9] E. A. Berberoğlu, E. Hasanoğlu Özkan, N. Kurnaz Yetim, C. Özcan, "Utilizing NiO nanoflowers for lead measurement in real samples," *Journal of Materials and Electronic Devices*, vol. 3, pp. 13-18, 2023.
- [10] M. Khan, R. Alosmanov, K. Wolski, S. Zapotoczny, and M. Soylak, "Magnetic adsorbent decorated with poly(n-isopropylacrylamide) (pnipam) brushes for the vortex-assisted solid phase extraction (vaspe) of lead in water, cigarettes and soil with high-resolution continuum source flame atomic absorption spectrometry (Hr-Cs FAAS)
- [11] Ş. Korkmaz, N. Kurnaz Yetim, E. Hasanoğlu Özkan, and C. Özcan, "Magnetic solid phase extraction of Co3O4@Fe3O4 nanoflowers for the enrichment of Cr6+ ions," *Current Topics in Analytical Chem.*, Dec. 2023.
- [12] D.N. Karaman, H. Serbest, Y. Kiliç, R. Demirel, and S. Bakirdere, "Trace cadmium determination in lake water matrix by flame atomic absorption spectrometry after manganese ferrite magnetic nanoparticles-based dispersive solid phase extraction," *Clean-Soil Air Water.*, vol. 5:9, July 2023. DOI10.1002/clen.202200186
- [13] R.O.Hassan, H.O. Othman, D.S. Ali, F. O. Abdullah, and D. A. Darwesh, "Assessment of the health risk posed by toxic metals in commonly consumed legume brands in Erbil, Iraq," *Journal of Food Composition and Analysis.*, vol. 120,

pp. 105282, July 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105282>

[14] H.J. Li, S. Ding, and J. Yuan, "Extraction of humic acids from lignite and its use as a biochar activator," *ACS Omega.*, vol. 8:13, pp. 12206-12216, Apr. 2023. DOI10.1021/acsomega.2c08192

[15] L. M. Costa, F. A. Borges, M.H.D. Cavalcanti, A.C. do Lago, C.R.T. Tarley, G.D.L. Martins, and E. C. Figueiredo, "Direct magnetic sorbent sampling flame atomic absorption spectrometry (DMSS-FAAS) for highly sensitive determination of trace metals," *Analytica Chimica Acta.*, vol. 1251, pp. 340709, Apr. 2023. DOI10.1016/j.aca.2022.340709

[16] P. Punia, M. K. Bharti, R. Dhar, P. Thakur, and A. Thakur, "Recent advances in detection and removal of heavy metals from contaminated water," *Chembioeng Reviews.*, vol. 9:4, pp. 351-369, Aug 2022. doi10.1002/cben.202100053

[17] D. D. Mai, T. H. Bui, V. H. Pham, T. H. Bui, T. K. Pham, D. C. Nguyen, and T. L. Nguyen, "Simultaneous adsorption of heavy metals on mesoporous reduced graphene oxide/ γ -Fe₂O₃ nanocomposites," *Journal of porous materials.*, vol. 29:6, pp. 1947-1956, Dec. 2022. doi10.1007/s10934-022-01306-1

[18] C.Y. Suo, D. D. Xu, R.F. Yuan, and B. H. Zhou, "Synchronous removal of Cd(II), Pb(II), and Cu(II) by coagulation in the presence of polymeric ferric sulfate," *Desalination and Water Treat.*, vol. 195, pp. 421-434, Aug. 2020. doi10.5004/dwt.2020.25928

[19] G.S.S. Sunder, S. Adhikari, A. Rohanifar, A. Poudel, and J.R. Kirchoff, "Evolution of environmentally friendly strategies for metal extraction," *Separations.*, vol. 7:1, Apr. 2020. DOI10.3390/separations7010004

[20] M.W. Alam, M. M. Rahman, M. S. Bhuyan, V. Senapathi, S. Y. Chung, S. Karthikeyan, S. Sekar, H. E. Elzain, and A. A. Nadiri, "Inferences on metal pollution in the natural spawning zone of Bangladesh river and pollution management strategies," *Environmental Monitoring and Assessment.*, vol. 195:1, pp.56, Jan 2023. doi10.1007/s10661-022-10544-4

[21] A. A. Gouda, R. El Sheikh, A. O. Youssef, N. Gouda, W. Gamil, and H.A. Khadrajy, "Preconcentration and separation of Cd(II), Co(II), Cu(II), Ni(II), and Pb(II) in environmental samples on cellulose nitrate membrane filter prior to their flame atomic absorption spectroscopy determinations," *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, vol. 103:2, pp. 364-377, Dec. 2020. doi10.1080/03067319.2020.1858070

[22] D. G. Kim, R.J.S. Palacios, and S.O. Ko, "Characterization of sludge generated by electrocoagulation for the removal of heavy metals," *Desalination and Water Treatment.*, vol. 52: 4-6, pp. 909-919, May 2014. doi10.1080/19443994.2013.826776

[23] M. Soylak, H. E. Hassan Ahmed, and A. N. Coban, "Micro-solid phase extraction of cobalt at trace levels as 1-nitroso-2-naphthol chelates on magnetic date palm fiber-WSe₂ (mDPF@WSe₂) nanocomposite from food, tobacco, and water samples," *Journal of Food Composition and Analysis.*, vol. 125, pp.105716, Jan. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105716>

[24] O.C. Bodur, E. Hasanoğlu Özkan, O. Çolak, H. Arslan, N. Sarı, A. Dişli, and F. Arslan,

"Preparation of acetylcholine biosensor for the diagnosis of Alzheimer's disease," *J. Mol. Struct.*, vol. 1223:129168, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129168>.

[25] F. Arslan, H. Koçak, O. C. Bodur, E. Hasanoğlu Özkan, B. Arslan, and N. Sarı, "Novel tyrosinase-based bisphenol-A biosensor for the determination of bisphenol-A in bracket adhesive in orthodontics," *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Eng.*, vol. 41:2, Dec. 2022. <https://dx.doi.org/10.20450/mjcc.2022.2585>

[26] N. Kurnaz Yetim, E. Hasanoğlu Özkan, and M.M. Koç, "Evaluation of dye removal

performance of magnetic dendrimers with immobilized HRP enzyme," *Jmed.*, vol. 3:1, pp. 6-12. Aug. 2023.

[27] E. Hasanoğlu Özkan, and N. Sarı, "Use of immobilized novel dendritic molecules as a marker for the detection of Glucose in artificial urine," *Journal of Mol. Struct.*, vol. 1201: 127134. Feb. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127134>.

[28] N. Kurnaz Yetim, and N. Sarı, "Preparation of ferrocene core dendrimers and immobilization of AChE for detection of diclofop-methyl herbicide," *Maced. J. Chem. Chem. Eng.* vol. 38:2, pp. 215-225, 2019. <https://doi.org/10.20450/mjcc.2019.1878>

[29] N. Kurnaz Yetim, M.M. Koç, and D. Nartop, "Magnetic dendrimer-encapsulated metal nanoparticles (Au, Ag): effect of dendrimerization on catalytic reduction of 4-nitrophenol," *J Iran Chem Soc.*, vol. 19, pp. 2569-2580, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13738-021-02476-6>

- [30] N. Kurnaz Yetim, F. Kurşun Baysak, M. M. Koç, and D. Nartop, "Synthesis and characterization of Au and Bi₂O₃ decorated Fe₃O₄@PAMAM dendrimer nanocomposites for medical applications," *J. Nanostructure Chem.*, vol. 11, pp. 589-599, Feb. 2021. <https://doi.org/10.1007/s40097-021-00386-w>
- [31] N. Kurnaz Yetim, E. Hasanoğlu Özkan, N. Akkurt, and M.M. Koç,. "Catalytic performance of Fe₃O₄@G2-PAMAM/MoO₃ magnetic nanocomposites for degradation of 4-NP to 4-AP," *J. mater. electron. device.*vol. 3, pp. 1-6, 2022.
- [32] N. Kurnaz Yetim, E. Hasanoğlu Özkan, and M.M. Koç, "Investigation of catalytic behaviour of WO₃ doped magnetic dendrimers," *Kırklareli University Journal of Engineering and Science.*, vol. 8:2, pp. 229-242, Dec. 2022. <https://doi.org/10.34186/klujes.1187397>
- [33] E. A. Berberoğlu, M.M. Koç, N. Kurnaz Yetim, and C. Özcan, "Highly efficient ZnO nanoflowers for the removal of highly toxic aqueous Pb(II) and Cr(VI)," *J Iran. Chem. Soc.*, vol. 20, pp. 2821-2830, Aug. 2023. <https://doi.org/10.1007/s13738-023-02878-8>
- [34] E. A. Berberoğlu, M.M. Koç, N. Kurnaz Yetim, and C. Özcan, "Sonochemical removal of highly toxic aqueous Cd²⁺ and Cr⁶⁺ ions using dandelion-like Co₃O₄ nanoflowers," *Open Journal of Nano.*, vol. 8:1, pp. 36-49. DOI: 10.56171/ojn.1192105
- [35] N. Kurnaz Yetim, and E. Hasanoğlu Özkan, "Synthesis of Au-doped magnetic nanocomposites: structural, magnetic, and catalytic properties," *J Mater Sci: Mater Electron.*, vol. 32, pp. 24766-24774, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06922-2>

PVSYST Simülasyon Aracı Kullanılarak Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Tavşanlı Yerleşkesi Şebeke Bağlantılı Güneş Enerjisi Santralinin Tasarımı ve Ekonomik Analizi

Abtullah Tuğcu ^{1*} 

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 43300, Tavşanlı, Türkiye

Geliş: 14.02.2023, Kabul: 08.12.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

ÖZ

Bu çalışmada, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Tavşanlı Yerleşkesinde kurulumu önerilen 200 kWp kurulu gücündeki fotovoltaik bir santralin tasarımı, performansı ve ekonomik analizleri PVsyst V 6.8.8 simülasyon yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. PVsyst simülasyon yazılımından elde edilen yıllık kayıp diyagramında, santralin kurulacağı konumda yatay düzlemdeki küresel ışınım miktarı yıllık 1494 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Tasarımı yapılan bu sistemde, verimi % 18,48 olan güneş panelleri 36°'lik eğim ve 0°'lik azimuth açısıyla güneye bakacak şekilde konumlandırıldıklarından panel yüzeyine gelen ışınım miktarı % 12,5 oranında artmaktadır. Sisteme ait % 7,85 dize, % 2,37 inverter kayıpları dikkate alındığında, santralden yılda 291,1 MWh enerjinin şebekeye verileceği düşünülmektedir. PVsyst yazılımı ile gerçekleştirilen ekonomik analizlerde santralin ilk yatırım maliyeti 231.864,0 \$. YEKDEM'in 10 yıl süre ile sabit alım garantili fiyatı olan 0,133 \$/kWh tarifesinden alım garantisi sonunda % 40 lık azalma ile şebekeye satılan enerjiden 681.978 \$ gelir elde edileceği hesaplanmıştır. Ekonomik analizin bilanço hesabında, 2034 yılındaki 237.378,0 \$ kazancıyla, tesisin kurulum maliyeti 10,2 yılda geri ödeme süresine ulaşmıştır. Santralin kullanım ömrü boyunca net kârı 88.272,67 \$, yapılacak yatırımın getiri oranı ise % 38,1 olarak hesaplanmıştır. Çalışma, güneş enerjisi santrali tasarımı ile ilgilenen araştırmacılara ulaşmayı amaçlamakta, güneş enerjisi santrali tasarımına ilişkin olarak coğrafi konum, bileşen seçimi, boyutlandırma, yerleştirme, gölgeleme analizi, performans ve ekonomik değerlendirmeler için bir yöntem sunmaktadır. Çalışmanın, Tavşanlı Yerleşkesine gelecekte yapılması planlanan güneş enerjisi santralinin kurulumuna katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Şebeke bağlı PV sistem; PVsyst; Simülasyon; Performans oranı; Ekonomik analiz

The Design and Economic Analysis of the Grid-Connected Solar Powerplant in Kütahya Dumlupınar University Tavşanlı Campus Using PVSYST Simulationtool

ABSTRACT

In this study, the design, performance and economic analysis of a 200 kWp photovoltaic power plant proposed to be installed in Tavşanlı Campus of Kütahya Dumlupınar University were carried out with PVsyst V 6.8.8 simulation software. In the annual loss diagram obtained from the PVsyst simulation software, the amount of global radiation in the horizontal plane at the location where the power plant will be installed has been calculated as 1494 kWh/m² per year. In this designed system, since the solar panels

with an efficiency of 18.48% are positioned facing south with an inclination of 36° and an azimuth angle of 0°, the amount of radiation reaching the panel surface increases by 12.5%. Considering 7.85% string losses and 2.37% inverter losses of the system, it is thought that 291.1 MWh of energy will be supplied to the grid per year from the power plant. In the economic analyses carried out with the PVsyst software, the initial investment cost of the power plant is \$231,864.0. It has been calculated that an income of \$681,978 will be generated from the energy sold to the grid with a 40% reduction at the end of the purchase guarantee from YEKDEM's \$0.133/kWh tariff, which is a fixed purchase guaranteed price for a period of 10 years. In the balance sheet account of the economic analysis, the installation cost of the facility with a gain of \$237,378.0 in 2034 reached a payback period of 10.2 years. The net profit of the power plant during its lifetime was calculated as \$88,272.67 and the rate of return on the investment to be made was calculated as 38.1%. The study aims to reach researchers interested in solar power plant design and provides a method for geographical location, component selection, sizing, placement, shading analysis, performance and economic evaluations related to solar power plant design. It is thought that the study will contribute to the installation of the solar power plant planned to be built in Tavşanlı Campus in the future.

Keywords: Grid connected PV system; PVsyst; Simulation; Performance ratio; Economic analysis

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiye paralel olarak küresel düzeyde karşılaşılan en önemli sorunlar enerji kaynaklarının yetersizliği ve fosil yakıtların neden olduğu çevre kirliliğidir. Enerji tüketimi ve üretiminin artmasıyla birlikte kirlilik de arttığından, enerji ve çevre sorunlarının çözülmesi zorunlu hale gelmektedir. Bu bağlamda, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımına acilen ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle güneş, rüzgâr ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları daha popüler hale gelmiş ve daha cazip bir çözüm olarak görülmeye başlanmıştır [1].

Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynağının değerlendirilmesi adına Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına yapılan çalışmalar son dönemde hız kazanmıştır. Bu çalışmalar sayesinde güneş enerjisinden elektrik üretimi ile ilgili pek çok araştırma yapılmakta ve güneş enerjisinden elektrik üretimi her geçen gün artmaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretimi için birden fazla metot bulunmasına rağmen genel anlamda eğilim, güneşten gelen ışığın doğrudan elektriğe dönüştürüldüğü fotovoltaiik sistemlere odaklanmıştır. Güneş enerjisinden etkin bir şekilde faydalanma konusundaki çalışmalar 1970'li yıllardan sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik anlamda ilerleme kat etmiş ve maliyet bakımından azalma eğilimi göstermiş, çevre açısından da temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir. Özellikle temiz bir enerji kaynağı olması ve kurulumdan sonra düşük maliyetle çalışması güneş enerjisinin önemini her geçen gün arttırmaktadır [2].

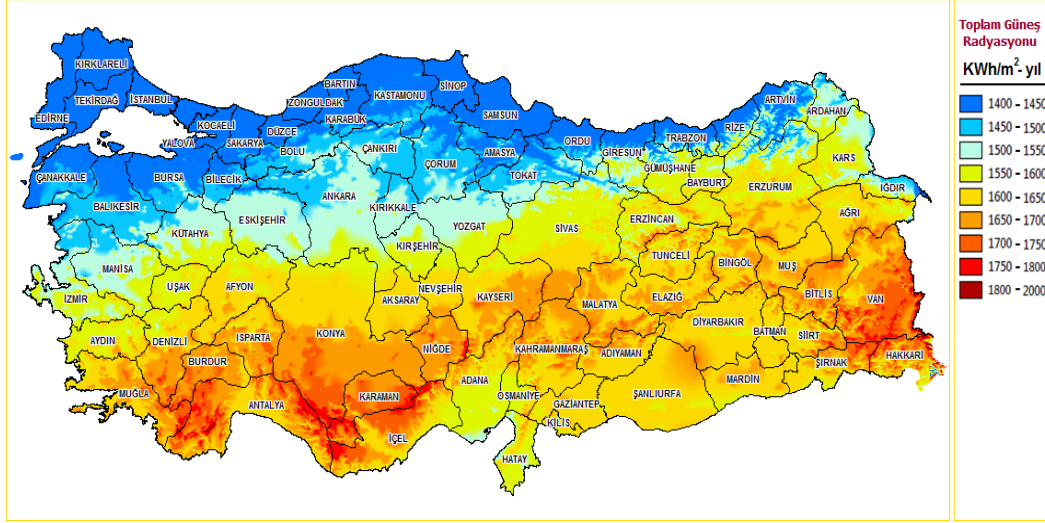
Güneş enerjisinin kullanımı ile ilgili plan ve programlar yapmadan önce bu kaynağın potansiyelinin tam olarak keşfedilmesi gerekmektedir. Bu nedenle de kamu kurumları ve üniversiteler güneş potansiyelini ölçmek ve bu kaynakla ilgili araştırma projeleri yapmak için çaba sarf etmektedir. Ancak Türkiye’de güneş enerjisinin değerlendirilmesi konusunda daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Tavşanlı Yerleşkesinde kurulumunu önerdiğimiz 200 kWp kurulu güce sahip güneş enerjisi santralının performans oranının ve sistemde meydana gelebilecek kayıp miktarlarını belirlemek için PVsyst yazılım programıyla şebekeye bağlı fotovoltaiik sistemin modellenmesi ve simülasyonu yapılmıştır. Çalışmada ayrıca tasarımı yapılan santralin ekonomik analizi de incelenmiştir.

1.1. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli

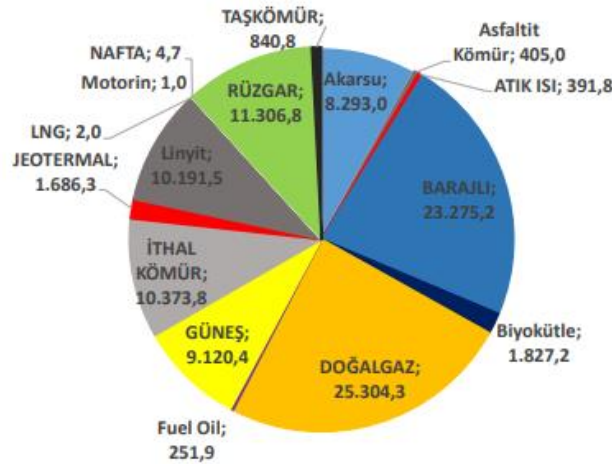
Ülkemiz 36°- 42° kuzey enlemleri ve 26°- 45° doğu boylamlarındaki coğrafi konumu ile Akdeniz güneş kuşağı içerisinde yer alır. Şekil 1’de Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) görülmektedir.

Şekil 1'deki yıllık güneşlenme oranları incelendiğinde, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresinin 2741,07 saat/yıl (günlük toplam 7,5 saat/gün), ortalama yıllık toplam ışıınım şiddetinin 1527,46 kWh/m²-yıl, ortalama günlük toplam ışıınım şiddetinin ise 4,18 kWh/m²-gün olduğu görülmektedir [3].



Şekil 1: Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası [3].

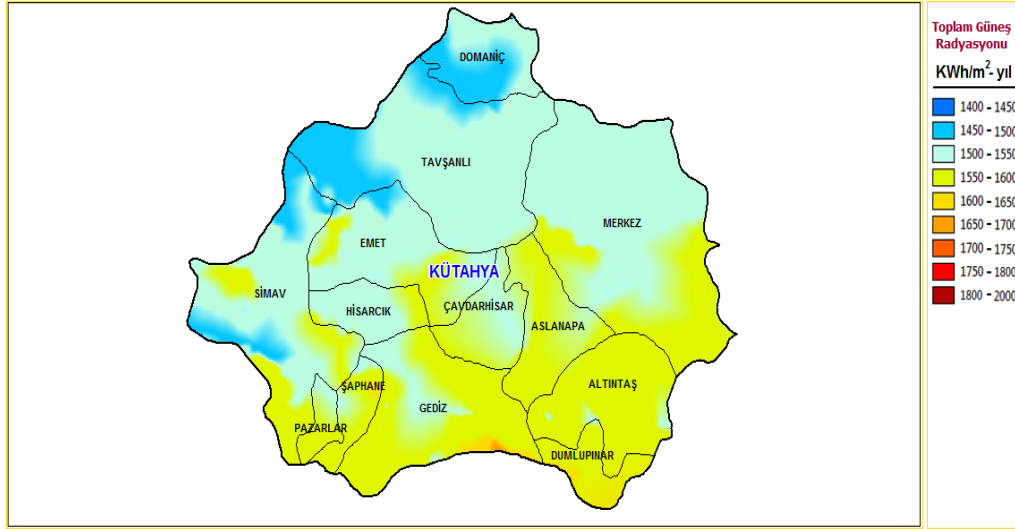
2022 yılı Ekim ayı TEİAŞ raporuna göre, ülkemizde üretilen toplam enerjiye ait kurulu güç miktarı 103,275.8 MW olarak görülmektedir. Şekil 2 incelendiğinde üretilen toplam enerjinin 9120.4 MW'ı, 9203 adet güneş santrali kullanılarak elde edilmiştir. TEİAŞ'ın aylık olarak hazırladığı bu raporlar incelendiğinde 2020 yılı sonu itibariyle güneş enerjisinden üretilen toplam enerji 6667.4 MW iken, 2022 yılı Ekim ayında bu değer 9120.4 MW'a yükselmiş, yeni kurulan ve devreye alınan güneş santralleri ile üretilen enerji miktarı her geçen gün artmaktadır [4].



Şekil 2: Ekim 2022 Türkiye'de kurulu güç dağılımı [4].

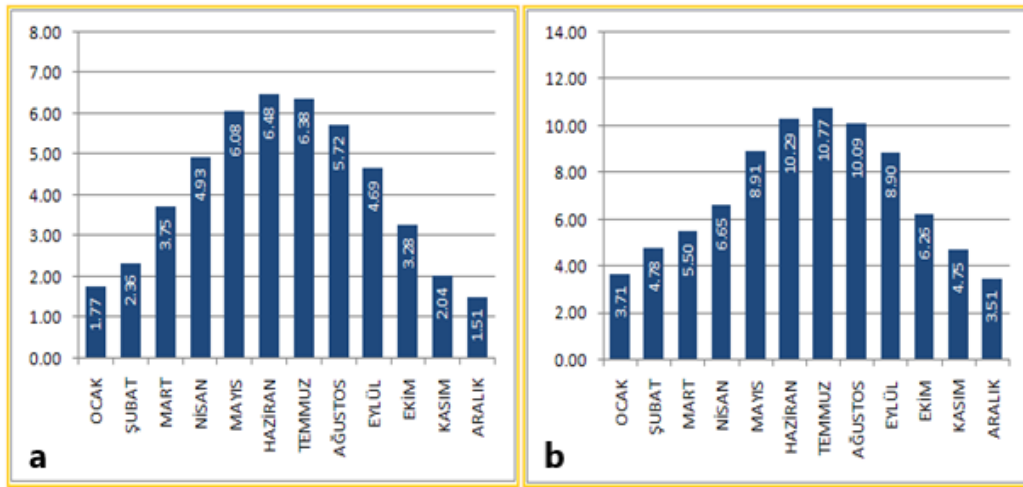
1.2. Kütahya ili güneş enerjisi potansiyeli

Şekil 3'ten görüldüğü gibi Tavşanlı ilçesinin yıllık ışıınım miktarı, 1450-1550 kWh/ m² dir. Türkiye toplam güneş radyasyonu ortalaması ise 1527,46 kWh/ m²-yıl'dır. Bu bilgiler ışığında, Tavşanlı ilçesinin güneş enerjisi sektöründeki yatırımlar için uygun olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3: Kütahya ili toplam güneş radyasyonu haritası [5].

İlçesinin global radyasyon değeri (kWh/m²-gün) ve güneşlenme süreleri (saat) sırasıyla Şekil 4.a ve Şekil 4.b'de görülmektedir [5].



Şekil 4: (a) Tavşanlı ilçesi Global Radyasyon Değerleri(kWh/m²-gün), (b) Güneşlenme süreleri (saat) [5].

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yapılan literatür araştırmasında, fotovoltaik güneş santralleri üzerine pek çok çalışmanın olduğu ve çalışmalar genel olarak incelendiğinde fotovoltaik sistemlerin, PVSOL, PVGIS, PVsyst, Retscreen, Homer, v.b simülasyon araçlarıyla tasarlanıp modellendiği, sistem performansı ve ekonomik analizlerin yapıldığı görülmüştür.

Haydaroğlu ve Gümüş (2016) çalışmalarında, Dicle Üniversitesinde kurulumu gerçekleştirilen 250 kWp'lik güneş enerji santralinin simülasyonu, PVsyst V6.39 simülasyon programı ile yapmışlar ve IEC 61724 standardında belirtilen performans kriterlerine uygun olarak santralin performansını analiz etmişlerdir. Çalışmalarında santrale ait Aralık 2015 ile Nisan 2016 dönemi arasındaki üretim değerlerini simülasyon sonuçları ile karşılaştırmışlardır [6]

Srivastava ve Giri (2017) çalışmalarında, Hindistan'nın Gorakhpur şehrindeki Madan Mohan Malaviya Teknoloji Üniversitesi için şebekeye bağlı bir fotovoltaik sistemi, PVsyst yazılımı kullanılarak tasarlanmışlardır. Simülasyondan, yıl boyunca üniversiteye elektrik sağlayabilen fotovoltaik sistemin optimal boyutlandırılmasını gerçekleştirmişler bu bağlamda sistem için 2000 adet PV modül ve şebekeye bağlı 10 adet inverter kullanımının, tasarımı yapılan sistem yükü için en uygun çözüm olduğunu tespit etmişlerdir. Sistemden şebekeye yıllık yaklaşık 901,4 MWh elektrik sağlanacağını belirtmektedirler [7].

Kumar ve diğ. (2017) çalışmalarında, Bir eğitim kurumunun elektrik ihtiyacını sağlamak için 100 kWp kurulu gücüne sahip şebekeye bağlı Si-poli fotovoltaik sistemi, PVsyst V6.52 simülasyon programını kullanarak tasarlamışlar ve sistemin performans analizini gerçekleştirmişlerdir. Simülasyonunu yaptıkları sistemde her biri 310 Wp gücündeki Si-poli PV panellerden 323 adet kullanmışlardır. Fotovoltaik modüllerin yerleşimi, 17 sıra halinde düzenlenmiş ve her bir sırada seri olarak bağlanan 19 modülden oluşturulmuştur. Her biri 20 kW'lık 4 adet inverter, bir şebeke sayacı aracılığıyla şebekeye bağlanmak için kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda 100 kWp kurulu güce sahip sistemden yıllık 165,38 MWh enerjinin üretilebileceğini, sistemin performans oranının % 80 civarında olduğunu ve sistem verimi yani faydalı enerji üretiminin 4,42 kWh/kWp/ gün olduğunu hesaplamışlardır [8].

Özcan ve Ersöz (2019) çalışmalarında, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik fotovoltaik sistemin uygulanmasını karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır. Uygulama aşamasında, belirlenmiş bir alan için PV sistem boyutlandırması yapılmıştır. Bu alan 5 alt üretim alanından oluşmakta ve 180.330 m²'lik bir alanı kaplamaktadır. Fotovoltaik sistemin toplam nominal kurulu gücü 8865 MW'dır. Sistemde kullanılan ekipmanların ve çalıştırılan personel sayılarının aynı olması koşuluyla sistemin üretimi ve finansal performansı, İstanbul, İzmir ve Ankara şehirleri için karşılaştırılmıştır. Bölgelerin yıllık güneş radyasyonu verileri ve ilgili optimum güneş paneli açıları, PVsyst programından sentetik olarak üretilmiş

ve sistemin belirtilen şehirleri için GEPA verileri ve yıllık üretim hesaplamaları yapılmıştır. Üretilen enerji miktarları sırasıyla 11366 MWh/yıl, 13606 MWh/yıl ve 12655 MWh/yıl, üretim performans oranları sırasıyla % 83, % 83 ve % 84,4 dür. Çalışmanın finansal analiz bölümünde, üç farklı şehir için yatırım getirileri sırasıyla 36 658 251 TL, 74 281 210 TL ve 69 840 678 TL ve proje Geri Ödeme Süreleri sırasıyla 13,6 yıl, 7,03 yıl ve 6,7 yıl olarak hesaplanmıştır [9].

Rawat ve dig. (2019) çalışmalarında, 5,63 kWh/m²'lik yıllık ortalama güneş radyasyonu miktarına sahip olan Hindistan'ın Gwalior şehrinde 30,5 kWp'lik kurulu güce sahip çatı üstü güneş santralini tasarımı ve performansı Pvsyst simülasyon programıyla analiz edilmiştir. Mevcut çalışmada 30,5 kWp kurulu güce sahip sistemden yıllık yaklaşık 55,670 MWh enerji üretiminin yapılabileceği ve sistemin performans oranının % 87 olduğu vurgulanmaktadır [10].

Ramadan ve Elistratov (2019) çalışmalarında, Suriye'de 300 kW'lık şebekeye bağlı bir güneş fotovoltaik (PV) santralini kurulumu için tekno-ekonomik fizibilite analizi yapmışlardır. Pvsyst yazılımı kullanılarak santralin teknik performans analizi, sistem konfigürasyonu, ayrıntılı kayıp değerleri ve enerji verim simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonuçları, PV modüllerinin optimum eğim açısının 25°, enerji üretiminin 493 MWh/yıl, yıllık ortalama performans oranının % 79,9 ve kapasite faktörünün % 18,7 olduğunu göstermektedir. Yazarlar ayrıca, Suriye'de kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketiminin 2232 kWh/yıl olduğu dikkate alındığında, önerilen 493 MWh/yıl kapasiteli güneş enerjisi santralinden 220 kişi/yıl enerji ihtiyacının sağlanabileceğini, yaklaşık 42,4 ton petrol eşdeğeri tasarrufun yapılabileceğini ve yılda yaklaşık 320,45 tCO₂ emisyonunun azaltılabileceğini belirtmektedirler. Önerilen FV santralin ekonomik değerlendirmesinde iskonto oranının % 9, proje ömrünün 25 yıl ve elektriğin Suriye elektrik dağıtım kuruluşuna satış fiyatının 0,119 \$/kWh olduğu dikkate alınarak yapılmıştır. Ekonomik hesaplamaların sonuçları, elektriğin üretim maliyetinin 0,094 \$/kWh, iskonto edilmiş geri ödeme süresinin yaklaşık 11 yıl, iç verim oranının % 14, karlılık endeksinin 1,46 ve net bugünkü değerinin 190587,3 \$ olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak yazarlar, önerilen şebekeye bağlı PV güneş enerjisi santralini Suriye'de ekonomik, teknik ve çevresel olarak uygulanabilir olduğunu düşünmektedirler [11].

Demiryürek ve dig. (2020) çalışmalarında, 200 kWp kurulu güce sahip, Lebit Enerji güneş santraline ait bilgileri, Pvsyst V6.67-TRIAL programına aktarılmışlar ve gerçek üretim değerleri ile simülasyondan elde ettikleri üretim değerlerini karşılaştırılmışlardır. Simülasyondan elde ettikleri rapor ile sisteme ait kayıpları analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, simülasyondan elde ettikleri üretim değerleri ile gerçek üretim değerleri arasında % 0.56'lık bir fark olduğunu görmüşlerdir. Elde edilen bu değer, kurulum aşamasında olan PV sistemleri için, oluşturulan fizibilite çalışmalarına önemli bir katkı sağlayabileceği gibi, kurulumu

gerçekleştirilmiş olan PV sistemlerinde verimli hale getirilebilmesi için, gerçekleştirilecek revizyon çalışmalarına ışık tutabileceğini belirtmektedirler [12].

Al-Shagea ve dig. (2021) çalışmalarında, Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesinin çatısında bulunan 5,1 kW'lık kurulu güce sahip sistemin gerçek üretim değerleri ile PVsol, PVSyst ve GEPA programlarından elde ettikleri tahmini üretim değerlerini kıyaslamışlardır. 2018-2019 yılları arasında, sistemin tahmini üretim performanslarını, PVSyst'a göre % 87,5-% 91, GEPA'ya göre % 96,6-% 100 ve PVsol verilerine göre ise % 97,3-% 98,1 aralığında gerçekleştiğini hesaplamışlardır [13].

Akinsipe ve dig. (2021) çalışmalarında, Nijerya'nın Jos kentinde şebekeden bağımsız elektrik üretimi için PV sistemin uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Jos kentinde (9.90N, 8.90E,) koordinatlarındaki bir konutun elektrik tüketimini karşılamak için şebekeden bağımsız bir PV sistemi tasarlamak ve analiz etmek için matematiksel bir modelleme yöntemi benimsemişlerdir. Matematiksel modelleme yaklaşımını uygulanarak yaptıkları çalışmada, her biri 275 Wp'lik 10 adet PV modülünün ve 100 Ah'lık 5 adet pilin her birinin yıllık yaklaşık 3132 kWh elektrik tüketimini karşılayabileceğini göstermişlerdir. Çalışmada ayrıca, yaşam döngüsü maliyet (LCC) analizi kullanılarak gerçekleştirdikleri ekonomik analizde, yaşam döngüsü maliyetinin (LCC), yıllık yaşam döngüsü maliyetinin (ALCC) ve elektrik maliyetinin (COE) sırasıyla 10.110,85 \$/kWh, 593.75 \$/kWh ve 0.18 \$/kWh olduğunu belirlemişlerdir. Bu modellemenin sonuçları ile elektrik üretimi için şebekeden bağımsız PV sisteminin hem teknik hem de ekonomik olarak uygulanabilirliğini göstermişlerdir [14].

Etcı ve Bilhan (2021) çalışmalarında, PVSyst ile Konya ilinde sabit ve çift eksenli güneş takip sistemlerinin modellenmesini yapmışlardır. PVSyst programı ile sabit veya çift eksenli güneş takip sistemlerinin kullanılması halinde Konya ilinin güneş enerjisi potansiyeline ait analizleri yapılmışlardır. PVSyst programı ile farklı tiplerdeki güneş takip sistemlerinin analizlerini karşılaştırılmışlardır [15].

Cura ve dig. (2022) çalışmalarında, Yunanistan'ın Kastoria kentinde 500 kW kurulu güce sahip, yere monte edilmiş ve Türkiye'nin Kocaeli şehrinde 110 kW kurulu güce sahip çatıya monte edilmiş iki farklı güneş santralinden alınan üretim değerlerini, PVSyst simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmışlardır. Elde edilen sonuçlardan Kastoria ve Kocaeli santralleri için performans oranları sırasıyla % 79 ve % 72,2, iç getiri oranı % 6,71 ve % 7,08, yapılan ekonomik analizlerde ise Net Bugünkü Değeri sırasıyla 821900 € ve 174072 € olarak elde etmişlerdir [16].

Garip ve dig. (2022) çalışmalarında, Milli Savunma Üniversitesi Deniz Harp Okulu Tuzla Kampüsü için sürdürülebilir, güvenli ve temiz enerji sağlamayı amaçlamışlardır. Tuzla Kampüsü için şebeke ve dizel jeneratörüne ek olarak güneş, rüzgâr, biyokütle kaynaklarının tümünü veya bir kısmını içeren teknik ve ekonomik olarak optimize edilmiş bir hibrit enerji sistemini tasarlamışlardır. Çalışmalarında güneş

radyasyonu, rüzgâr hızı, beklenen enflasyon, elektrik birim fiyatları gibi değişkenlerin sistem üzerindeki etkileri analiz edilmişlerdir. Çalışma, Homer yazılımı aracılığıyla yasal düzenlemelere dayalı iki farklı senaryo altında yürütülmüştür. Sonuç olarak, her iki senaryoda da optimum sistem, fotovoltaik ve rüzgar türbinlerinden oluşan şebekeye bağlı hibrit bir sistemdir. Sonuçlar, net mevcut enerji maliyetinde % 86,2 – % 90, birim enerji maliyetinde % 92,7 -% 95,8, işletme ve bakım maliyetlerinde 862.093 \$-933.695 \$, emisyonlarda % 79 -% 82 azalma olduğunu göstermiştir [17].

Ayousha ve Abdullah (2022) çalışmalarında, Suudi Arabistan Krallığı, Dammam, AL Juaimah’da on-grid bir fotovoltaik sistemin PVsyst simülasyon programı ile tasarımını ve ekonomik analizini yapmışlardır. 960 kWp kurulu gücüne sahip santral tasarımı için 1920 adet PV panel ve 8 adet evirici kullanarak, PVsyst simülasyon programından enerji üretimini 1616,9 MWh/yıl, performans oranının % 82,3, geri ödeme süresini 6,9 yıl ve CO2 azalımı ise 29878,2 tCO2 olarak bulmuşlardır [18].

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmanın amacı, PVsyst simülasyon aracı kullanılarak tasarımı yapılan sistemin yıllık üreteceği enerji miktarının, performans oranının ve ekonomik analiz çalışmasıyla santralin amortisman süresinin belirlenmesidir. Çalışma kapsamında Tavşanlı yerleşkesinin 2022 yılı aylık elektrik tüketim miktarları incelenmiştir. Yerleşke Tavşanlı Uygulamalı Bilimler Fakültesi ve Tavşanlı Meslek Yüksekokulundan oluşmaktadır. Çizelge 1’de yerleşkenin aylara göre elektrik tüketimleri ve fatura miktarları verilmiştir.

Çizelge 1: 2022 yılına ait yerleşkenin elektrik tüketimi ve fatura miktarları [19]

Tavşanlı Uygulamalı Bilimler Fakültesi			Tavşanlı Meslek Yüksekokulu		
Ay	Elektrik Tüketim Verileri (kWh/ay)	Fatura Miktarı (TL/ay)	Ay	Elektrik Tüketim Verileri (kWh/ay)	Fatura Miktarı (TL/ay)
Ocak	8.620,17	22.412,44	Ocak	7.220,92	18.786,30
Şubat	6.648,15	17.152,22	Şubat	6.822,96	17.751,00
Mart	9.514,41	22.549,15	Mart	8.819,52	20.945,06
Nisan	8.268,27	21.497,50	Nisan	6.809,12	17.714,90
Mayıs	7.959,15	20.057,05	Mayıs	6.811,48	17.221,10
Haziran	5.147,40	16.729,05	Haziran	4.508,52	14.662,00
Temmuz	4.276,62	13.899,01	Temmuz	4.039,48	13.136,70
Ağustos	4.345,60	14.123,20	Ağustos	4.179,88	13.593,20
Eylül	4.734,78	20.017,10	Eylül	4.929,60	20.840,80
Ekim	7.622,43	32.225,30	Ekim	8.999,12	38.045,50
Kasım	6.983,32	29.523,38	Kasım	7.134,20	30.161,20
Aralık	9.324,68	39.421,94	Aralık	9.676,88	40.910,80
Toplam	83.444,98 (kWh/yıl)	269.607,34 (TL/yıl)	Toplam	79.951,68 (kWh/yıl)	263.768,56 (TL/yıl)

Çizelge 1’den görüldüğü üzere yerleşkede, yıllık 163.396,66 kWh elektrik tüketimine karşılık olarak 533.375,90 TL elektrik faturası ödendiği görülmektedir.

Şebeke bağlı sistemler (on-grid), üretilen enerjiyi uzak noktalara taşımadan en yakında bulunan dağıtım şebeke sistemine bağlanarak iletim, dağıtım kayıplarını en az oranda tutabilmektedir. Bu sistem, üretilen elektriğin, üretildiği anda ve üretildiği yerde hiçbir ilave depolama (akü, batarya v.b) birimi olmadan şebekeyi beslediği ve anında kullanıldığı sistemlerdir [20]. Son yıllarda on-grid sistemlerde, teknolojik gelişmelere bağlı olarak ilk yatırım ve bakım maliyetlerinde kayda değer bir düşüş söz konusu olduğundan tasarımı gerçekleştirdiğimiz santral şebeke bağlı (on-grid) bir güneş santralidir.

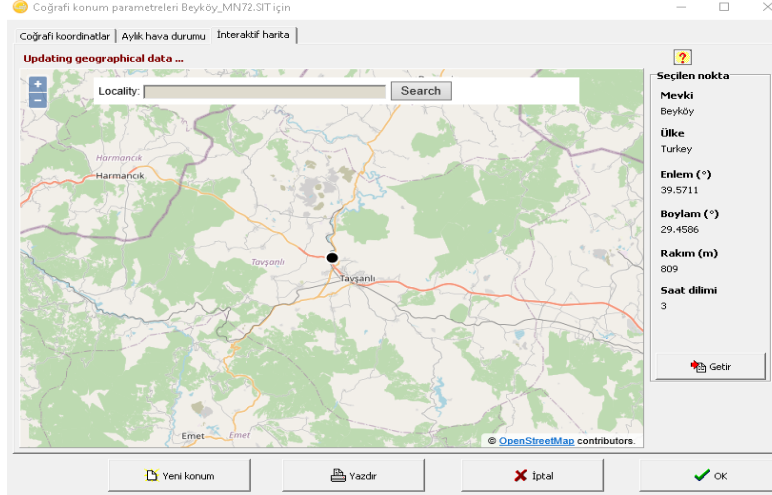
Tavşanlı ilçesinin Şekil 4.a’da verilen global radyasyon değerleri (kWh/m²), Şekil 4.b’deki güneşlenme süreleri (saat) ve Çizelge 1’deki yerleşkenin elektrik tüketim verileri de göz önünde bulundurularak, lisansız olarak kurulumunu düşündüğümüz santralin gücünü, yerleşkenin ihtiyacı olan elektrik üretildikten sonra tüketim fazlası elektriğin kayıt altına alınarak mahsuplaştırılıp şebekeye satılarak yerleşkede bulunan okullar için gelir elde edilmesi düşünülebileceğinden 200 kWp olarak planlanmıştır. Güneş enerjisi santrali, Kütahya ili Tavşanlı ilçesine bağlı Beyköy mevkiinde 39° 57’ 11” Kuzey ve 29° 45’ 86” Doğu koordinatlarına kurulacaktır. Şekil 5’de santralin kurulacağı yerleşke görülmektedir.



Şekil 5: Tavşanlı yerleşkesi.

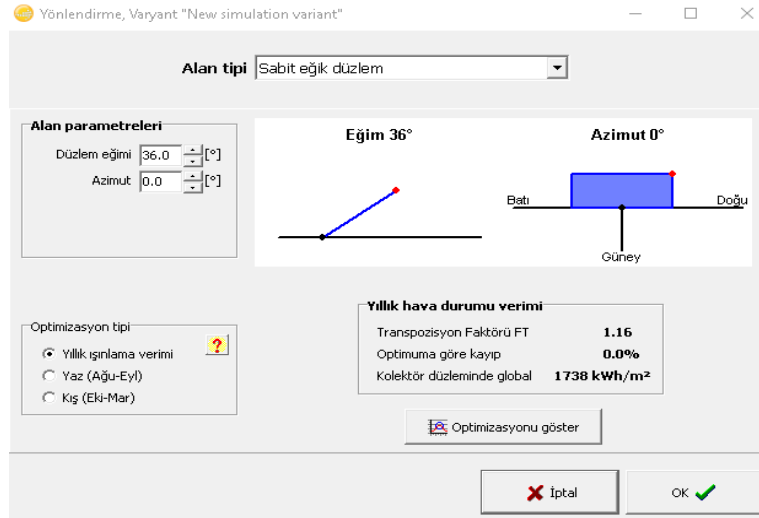
Şekil 5’den de görüldüğü gibi enerji santralinin kurulumu için yerleşkede, gölgelenme unsurlarının ve arazi eğiminin bulunmadığı, ulaşımın kolaylıkla sağlandığı ve enerji nakil hattına yakınlığı sebebiyle yaklaşık 40000 m²’lik bir arazinin seçimi yapılmıştır. Hava sirkülasyonunun, panel verimlerine etkisi düşünüldüğünde, panellerin yerleştirileceği alanda rüzgârı kısıtlayan bir unsur bulunmamaktadır. Bu sayede rüzgâr, yaz aylarında panellerin sıcaklığının düşmesine yardımcı olacak ve sistemin verimini arttıracaktır.

Şekil 6’da görüldüğü üzere santralin coğrafi konumuna ait meteorolojik veriler, PVsyst simülasyon aracının Meteororm veri tabanından yapay ortamda elde edilmiştir.



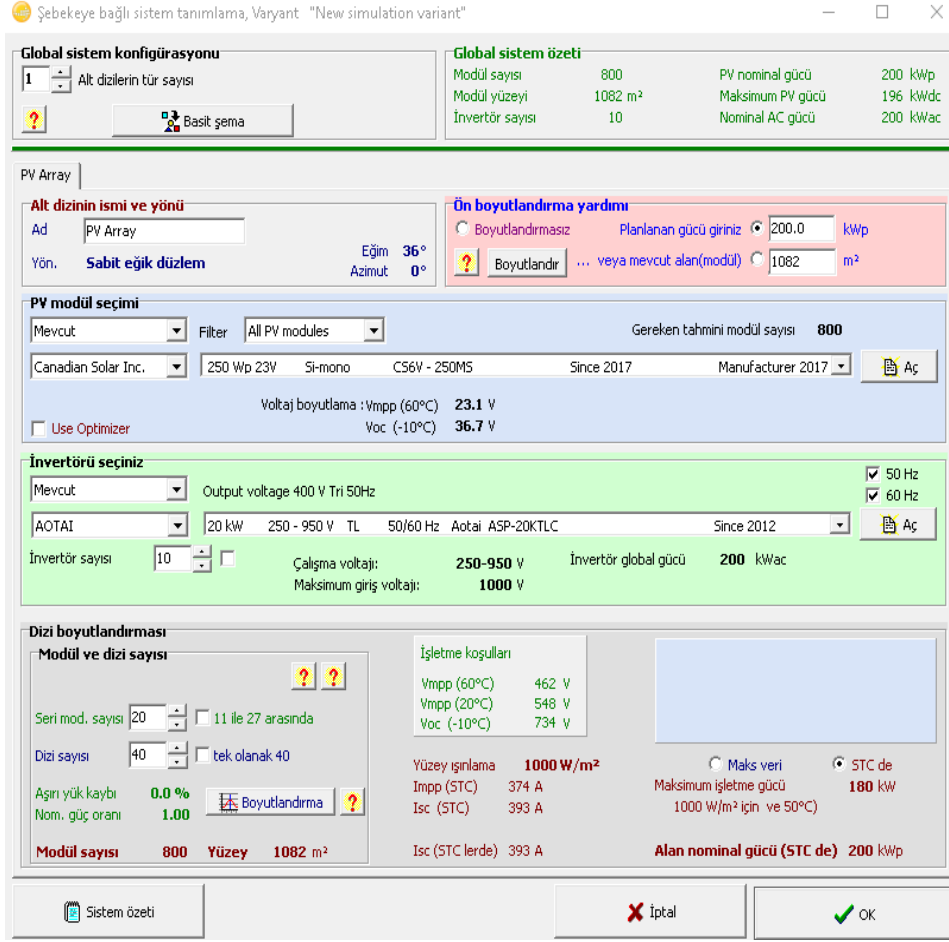
Şekil 6: Çalışma alanına ait meteorolojik verilerin aktarılmasına ilişkin ekran alıntısı.

Şekil 7’de fotovoltaik güneş panelleri için gerçekleştirilen eğim ve azimuth açı değerleri verilmektedir.



Şekil 7: Panellere ait eğim ve azimuth açı değerlerini gösteren ekran alıntısı.

Şekil 7 incelendiğinde, güneş panelleri sabit eğik sistemde 36° eğim ve 0° azimuth açısı ile konumlandırılmıştır. PVsyst simülasyon programında, planlanan kurulu güç ve PV modüllerin yerleştirileceği mevcut alan üzerinden gerekli hesaplamalar yapılarak panellere, inverterlere, seri ve paralel dizelere ait seçimler yapılmıştır. Şekil 8’de sistem bölümüne ait ekran görüntüsü görülmektedir.



Şekil 8: Tavşanlı yerleşkesi güneş santrali sistem bilgileri ekran alıntısı.

Çizelge 2’de seçimi yapılan panellerin katalog bilgileri görülmektedir. Tasarımda katalog değerleri verilen Canadian Solar Inc marka 250 Wp 23Vgücünde Si-mono CS6V-250 MS tipindeki panellerden 800 adet kullanılmıştır. Bu panellerin 20’şer adedi seri bağlanacak şekilde tasarlanarak 40 adet string, 4’er adet string paralel bağlanarak 10 adet array meydana getirilmiştir.

Çizelge 2: Canadian Solar Inc güneş paneli katalog bilgileri [21]

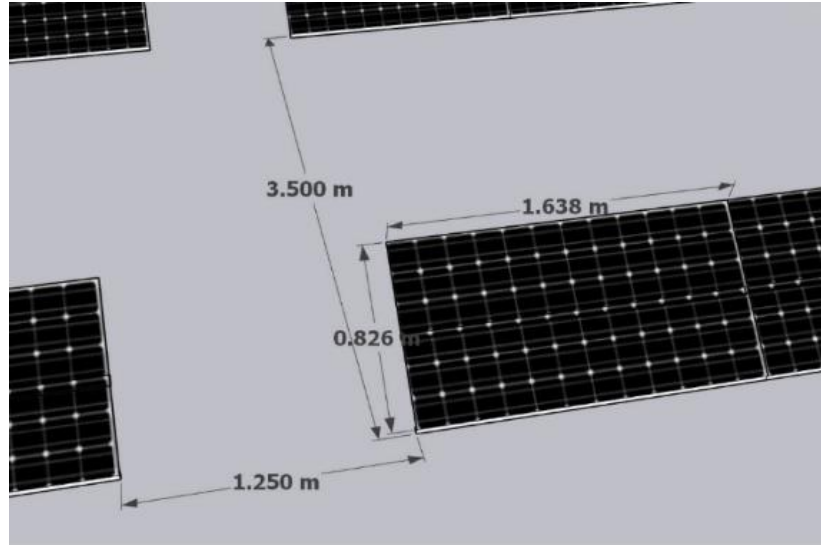
Elektriksel Özellikler		Mekaniksel Özellikler	
Nominal Güç (Pmax)	250 Wp	Hücre Teknolojisi	Si-mono
Açık Devre Gerilimi (Voc)	33.10 V	Hücre Sayısı	60 (6x10)
Kısa Devre Akımı (Isc)	9.83 A	Panel Uzunluğu	1638 mm
Nominal Gerilim (Vmpp)	27.00 V	Panel Genişliği	826mm
Nominal Akım (Imp)	9.26 A	Panel Kalınlığı	40 mm
Modül Verimi (%)	14.8	Ağırlık	16 kg

Çizelge 3'te katalog bilgileri verilen AOTAI ASP-20KTLC marka inverterlerden her array çıkışına 1 adet olmak üzere toplam 10 adet inverter kullanılmıştır. Montajı, bakımı ve sevkiyatının kolaylığı nedeniyle dizi inverter tercih edilmiştir.

Çizelge 3: AOTAI ASP-20KTLC inverter katalog bilgileri [22]

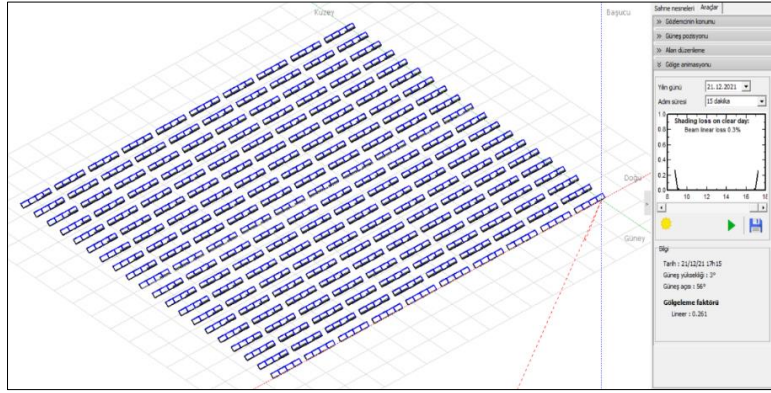
Giriş verileri		Çıkış verileri	
Maksimum DC giriş gücü	24 KW	Nominal çıkış gücü	20 KW
Maksimum DC giriş voltajı	1000 V	Maksimum çıkış gücü	22 KVA
Maksimum DC giriş akımı	22/22 A	Maksimum çıkış akımı	33 A
MPPT voltaj aralığı	250-950 V	Anma şebeke gerilimi	400 V
MPP çalışma gerilimi	650 V	Şebeke voltaj aralığı	310-480 Vac
MPPT sayısı	2	Nominal şebeke frekansı	50 Hz/60 Hz
Sistem verisi		Mekanik veri	
Verim	% 98.5	Boyut (ExBxY)	517x510x191 mm
Soğutma türü	Hava soğutma	Ağırlık	25 kg
Sıcaklık aralığı	-25~+60°C	Koruma sınıfı	IP65

Şekil 9'da görüldüğü gibi PVsyst simülasyon programı ile PV panellerin 3 boyutlu modellenmesi yapılmış, panel yerleşiminin üç boyutlu çiziminde seri şekilde bağlı güneş panelleri arasındaki mesafe 3,5 m, paralel bağlanarak oluşturulan 10 adet array arası mesafe 1,25 m ve modüllerin toplam alanı ise 1082 m² olarak tasarlanmış ve sisteme aktarılmıştır.



Şekil 9: Panellerin 3 boyutlu modellenmesi.

Santralin kurulacağı bölgede, gölgelenme unsuru bulunmamasına rağmen panel yerleşimine bağlı olarak bir gölgelenme olabileceği düşüncesiyle, Şekil 10'da verilen gölgelenme analizi PVsyst yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 10: Panellerin 3 boyutlu yerleşimi ve gölgelenme analizi ekran görüntüsü.

Şekil 10'daki gölgelenme analizi incelendiğinde, sabah saat 09:00 öncesi ve öğleden sonra saat 17:00 sonrası panel yerleşimine bağlı olarak % 0,3 oranında gölgelenme söz konusudur.

4. EKONOMİK ANALİZ

Çizelge 4'te verilen 16/11/2022 tarihli Merkez Bankasının kur verileri kullanılarak, Çizelge 5'te görülen santrale ait maliyet çizelgesi oluşturulmuştur. Pvsyst simülasyon programının ekonomik değerlendirme sekmesi kullanılarak, santralin öz sermaye ile kurulması incelenmiştir. Çalışma kapsamında CO2 emisyon değeri de tespit edilmiştir.

Çizelge 4: Kur değeri [23]

ABD Doları (\$) / TL
18,59

Çizelge 5: Maliyet çizelgesi

Maliyet kalemleri	Tutar (\$)
PV Modül (Mono kristal)	133444 \$
İnverter	23240 \$
Personel Binası	8760 \$
Kablolar AC-DC	13000 \$
Konstrüksiyon	17000 \$
Koruma Ekipmanları	5000 \$
Trafo, beton, köşk	7000 \$
İşçilik + Nakliye	8420 \$
Diğer (Arazi düzenleme, sigorta, projelendirme, onay bedeli, kamera, tel örgü, panolar, uzaktan izleme, beklenmeyen giderler v.s)	16000 \$
Personel Giderleri	10973,64 \$/ yıl
Bakım ve onarım	3500 \$/ yıl

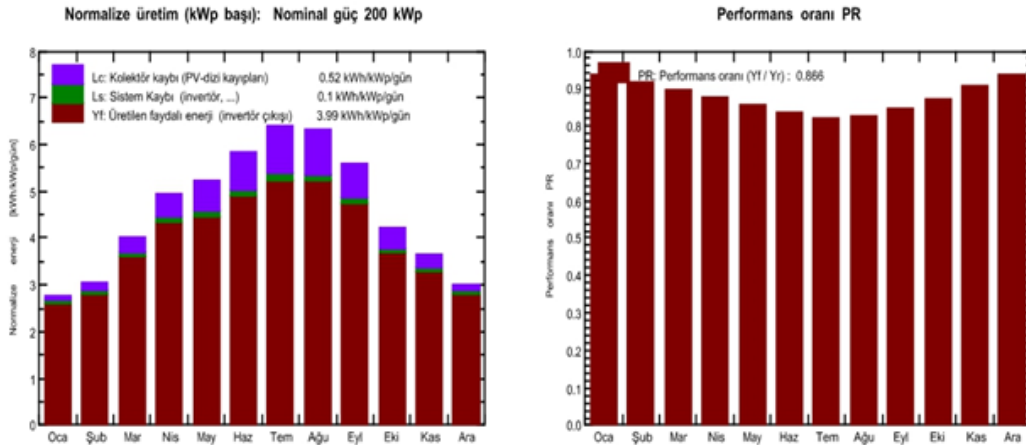
PVsyst simülasyon aracıyla yapılan ekonomik analiz için Çizelge 6'daki kabuller yapılmıştır.

Çizelge 6: Kabuller

Maliyet Kalemleri	Tutar (\$)
YEKDEM'in alım garantili fiyatı (10 yıllık)	0,133 \$/kWh
Garantili alım sonunda satış fiyatı	% 40 düşüş öngörülmekte.
Elektrik satış oranı	% 100
Projenin faydalı ömrü	25 yıl
Yıllık üretimdeki düşüş	% 0,7
KDV	% 0

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yerleşke için tasarımını yaptığımız fotovoltaik santralin, enerji üretim değeri, enerji kayıp miktarı, aylık bazdaki performans oranları ve ekonomik analiz bulguları Pvsyst simülasyon programı ile elde edilmiştir. Şekil 11'de santrale ait üretim ve performans verileri görülmektedir.



Bilanço ve genel sonuçlar

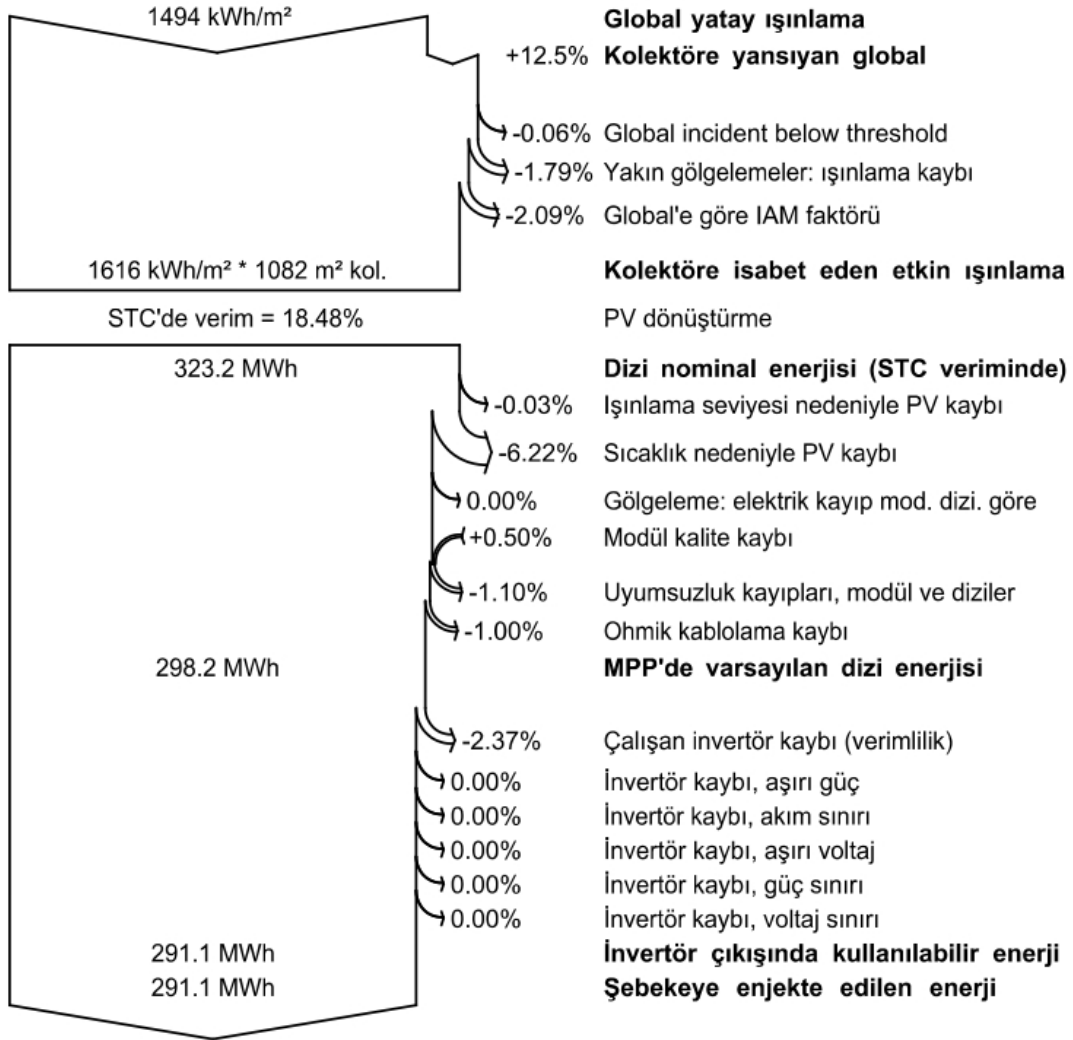
	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	MWh	MWh	
Ocak	53.3	25.00	0.57	86.4	83.9	16.58	16.16	0.936
Şubat	64.7	34.23	1.73	85.8	82.9	16.13	15.71	0.915
Mart	102.5	51.75	6.44	124.4	119.7	22.91	22.34	0.898
Nisan	140.2	66.20	10.54	148.9	142.7	26.75	26.12	0.877
Mayıs	171.3	81.74	15.86	162.4	154.8	28.47	27.78	0.855
Haziran	194.8	81.38	20.04	175.7	167.4	30.11	29.40	0.837
Temmuz	214.0	68.30	23.38	198.7	190.4	33.33	32.56	0.820
Ağustos	190.0	72.39	23.27	196.1	188.1	33.07	32.33	0.824
Eylül	142.8	52.49	17.79	168.2	162.0	29.10	28.45	0.846
Ekim	97.5	42.62	13.17	131.5	127.3	23.49	22.93	0.872
Kasım	69.1	32.44	6.85	109.5	106.2	20.33	19.85	0.907
Aralık	54.3	25.91	2.22	93.2	90.5	17.91	17.49	0.938
Yıl	1494.4	634.46	11.88	1680.6	1615.9	298.18	291.11	0.866

Açıklama: GlobHor Global yatay ışınlama
 DiffHor Yatay dfüz ışınlama
 T_Amb Ortam sıcak.
 GlobInc Kolektöre yansıyan global
 GlobEff IAM ve gölgeleme için düzeltilmiş etkin Global
 EArray Dizinin çıkışında etkin enerji
 E_Grid Şebekeye enjekte edilen enerji
 PR Performans oranı

Şekil 11: Santrale ait üretim ve performans verileri.

Şekil 11 incelendiğinde, ortam sıcaklığının artış gösterdiği aylarda enerji üretiminde de artış yaşandığı, yaz aylarında sıcaklık artışı nedeniyle PV hücrelerinin verimindeki azalmadan dolayı sistemin yaz aylarındaki performansının düştüğü, kış aylarında yükseldiği, ortalama performans oranının ise % 86,6 olduğu görülmektedir. Şekil 12’de PVsyst’den elde edilen sisteme ait yıllık kayıp diyagramı görülmektedir.

Yıl boyu kayıplar diyagramı



Şekil 12: Simülasyon aracından alınan sisteme ait yıllık kayıp diyagramı.

Şekil 12’de görüldüğü üzere santralin kurulacağı yerde yatay düzleme gelen küresel ışınım miktarı 1494 kWh/ m²-yıl olarak bulunmuştur. Verim değeri % 18,48 olan fotovoltaik paneller 36°'lik eğim açısıyla

güneye bakacak şekilde konumlandırıldıklarından, panel yüzeyine düşen ışım miktarı % 12,5 artmaktadır. Eşik altı küresel kayıplar % 0,06, gölgelenme kayıpları % 1,79, yansıma kayıpları % 2,09 olarak ölçülmüş olup söz konusu kayıplar nedeniyle panele düşen ışım miktarı yıllık 1616 kWh/m² dir. Tasarımı gerçekleştirilen sistemde % 7,85'lik dize kaybı, % 2,37 inverter kaybı bulunmaktadır. Bahsi geçen kayıplar dikkate alındığında santralden yılda 291,1 MWh enerjinin şebekeye verileceği hesaplanmıştır. Şekil 13'te öz sermaye ile kurulumu düşünülen santral için simülasyon yazılımından alınan uzun vadeli maliyet analizi gösterilmiştir.

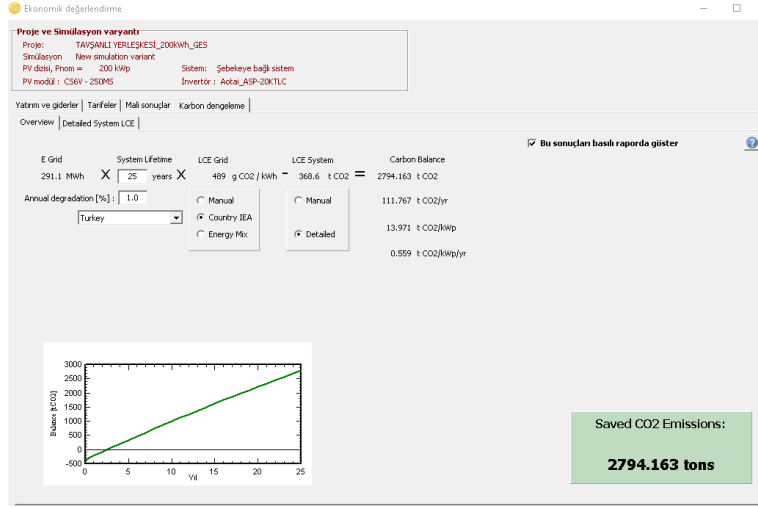
Detaylı ekonomik sonuçlar (USD)

Yıl	Satılan enerji	İşletme gider.	Amortis. payı	Vergi. tabi gelir	Vergi %0.00	Net kâr	Birikmiş kâr	% itfa
2024	38'718	14'474	9'275	14'970	0	24'244	24'244	%10.5
2025	38'447	14'474	9'275	14'699	0	23'973	48'218	%20.8
2026	38'176	14'474	9'275	14'428	0	23'702	71'920	%31.0
2027	37'905	14'474	9'275	14'157	0	23'431	95'351	%41.1
2028	37'634	14'474	9'275	13'886	0	23'160	118'511	%51.1
2029	37'363	14'474	9'275	13'615	0	22'889	141'400	%61.0
2030	37'092	14'474	9'275	13'344	0	22'618	164'019	%70.7
2031	36'821	14'474	9'275	13'073	0	22'347	186'366	%80.4
2032	36'550	14'474	9'275	12'802	0	22'076	208'442	%89.9
2033	36'279	14'474	9'275	12'531	0	21'805	230'247	%99.3
2034	21'605	14'474	9'275	0	0	7'131	237'378	%102.4
2035	21'442	14'474	9'275	0	0	6'968	244'346	%105.4
2036	21'279	14'474	9'275	0	0	6'806	251'152	%108.3
2037	21'117	14'474	9'275	0	0	6'643	257'795	%111.2
2038	20'954	14'474	9'275	0	0	6'481	264'275	%114.0
2039	20'792	14'474	9'275	0	0	6'318	270'593	%116.7
2040	20'629	14'474	9'275	0	0	6'155	276'749	%119.4
2041	20'466	14'474	9'275	0	0	5'993	282'741	%121.9
2042	20'304	14'474	9'275	0	0	5'830	288'571	%124.5
2043	20'141	14'474	9'275	0	0	5'667	294'239	%126.9
2044	19'978	14'474	9'275	0	0	5'505	299'744	%129.3
2045	19'816	14'474	9'275	0	0	5'342	305'086	%131.6
2046	19'653	14'474	9'275	0	0	5'180	310'265	%133.8
2047	19'491	14'474	9'275	0	0	5'017	315'282	%136.0
2048	19'328	14'474	9'275	0	0	4'854	320'137	%138.1
Toplam	681'978	361'841	231'864	137'501	0	320'137	320'137	%138.1

Şekil 13: Simülasyon aracından alınan sisteme ait yıllık kayıp diyagramı.

Şekil 13 incelendiğinde, santralin yatırım maliyeti 231.864 \$, YEKDEM'in 10 yıl süre ile sabit alım garantili fiyatı olan 0,133 \$ /kWh tarifesiinden sonra % 40'lık bir azalma ile şebekeye satılan enerjiden 681.978 \$ gelir elde edileceği hesaplanmıştır. Ekonomik analizin bilanço hesabında, 2034 senesinde 237.378 \$ kazancıyla, 231.864 \$ olan tesisin yatırım maliyeti 10,2 yılda geri ödeme süresine ulaşmıştır. Sistemden üretilen enerji maliyet değeri 0,082 \$/kWh, sistemin kullanım ömrü süresince net kârı 88.272,67 \$, yatırımın

getiri oranı ise % 38,1 olacak şekilde hesaplanmıştır. Önümüzdeki yıllarda fotovoltaik sistem kurulum maliyetlerinin yerli üretim teşvikler ile daha da aşağılara düşeceği öngörüsüyle 10,2 yıl olarak hesaplanan geri ödeme süresinin düşeceği düşünülmektedir. Şekil 14'te Pvsyst simülasyon programından elde edilen CO2 emisyon değeri görülmektedir.



Şekil 14: PVsyst'den elde edilmiş CO2 emisyon değeri.

Şekil 14 incelendiğinde 291,1 MWh elektrik üretiminin gerçekleşmesi durumunda 2794,163 tCO₂ sera gazının atmosfere salınımı azaltılabilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Tavşanlı Yerleşkesinde kurulumu önerilen 200 kWp kurulu güce sahip şebeke bağlı güneş santralının PVsyst simülasyon yazılımı aracılığıyla tasarımı, performansı ve ekonomik analizleri yapılmıştır.

Tasarımı yapılan sistemden panel verimi, sıcaklık ve inverter kayıpları göz önüne alındığında, yıllık 291,1 MWh elektrik enerjisinin üretilebileceği hesaplanmıştır. Üretim ve performans verileri dikkate alındığında, ortam sıcaklığının artış gösterdiği aylarda enerji üretiminde arttığı gözlemlenmiştir. Şebeke hattına en fazla 32,56 MWh ile Temmuz ayında, en az 15,71 MWh ile Şubat ayında elektrik enerjisi aktarılmıştır. Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında ortam sıcaklığının yükselmesi dolayısıyla, PV hücrelerinin verimlerdeki düşüşe bağlı olarak, sistemin yaz aylarındaki performansı azalmakta, kış aylarındaki performansı ise artmaktadır. En düşük performans oranının % 82 ile Temmuz ayında, en yüksek performans oranının ise % 93,8 ile Aralık ayında gerçekleştiği görülmektedir. Sisteme ait ortalama performans oranı % 86,6 tır.

Çalışmanın ekonomik analizinde, santralin kurulum maliyeti 10,2 yılda geri ödeme süresine ulaşmaktadır. Sistemden üretilen enerji maliyeti 0,082 \$/kWh, santralin kullanım ömrü süresince net kârı 88.272,67 \$, yatırımın getiri oranı ise % 38,1 olarak belirlenmiştir. Yıllık 291,1 MW elektrik üretiminin gerçekleşmesi durumunda, 2794,163 tCO₂ sera gazı emisyon miktarı azaltılabilir ve sera gazı azalım geliri elde edilebilir. 5346 sayılı yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretim amaçlı kullanımına ilişkin kanunda, yapılan yatırımın cinsine göre yerli üretim desteği 0,067 \$/kWh, toplam en yüksek değer ise 0,2 \$/kWh olarak görülmektedir. Yukarıda belirtilen 0,133 \$/kWh alım fiyatı, yerli üretim teşviklerinden faydalanılarak kurulan ve şebekeye bağlanan bir fotovoltaik sistem için 0,2 \$/kWh alım fiyatı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durumda sisteme yerli üretim teşvikleri dahil edilerek, kurulumu önerilen santralin öz sermaye ile kurulması halinde geri ödeme süresinin 5,2 yıla düşeceği yapılan hesaplamalar ile saptanmıştır.

GES'ler için ayrılan teşvikler YEKDEM bazında tüm yenilenebilir enerji teknolojilerinin üstünde olsa da diğer ülkeler ile kıyaslandığında ülkemizin teşvik sisteminin birim fiyat değeri olarak daha aşağılarda olması yatırımcıların çekingen davranışlar sergilemesine neden olmaktadır. GES sektöründe öne çıkan bir diğer konu ise kamu alım garantisidir.

Çizelge 1'deki yerleşkeye ait 2022 yılı Ocak-Aralık arasındaki elektrik tüketim değerlerine göre yerleşkede 163.396,66 kWh (163,396 MWh) elektrik enerjisi tüketilmiştir. Kurulumu önerilen sistem ile yerleşkenin elektrik tüketim miktarı üretildikten sonra yaklaşık 127,704 MWh enerji fazlalığı öngörülmektedir. Mahsuplaştırma yöntemiyle elektrik alışverişi kayıt altına alınmak suretiyle, kullanım fazlası elektrik miktarının şebekeye satılarak yerleşkede bulunan okullar için gelir elde edilmesi planlanabilir. Bu bilgiler ışığında PV sistemden elektrik üretimi, yerleşke için iyi bir seçenek olarak ön plana çıktığı görülmektedir. Tavşanlı yerleşkesinde kurulumu önerilen sistem, lisans ve önlisans eğitimi alan öğrenciler için enerji alanında eğitim laboratuvarı özelliğinde olacağından dolayı, bu alanda istihdama da katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Santralin kurulum aşamasında, PV modül ve inverter sayısını belirlemesi için saatlik ortalama yük talebine göre HOMER, HYBRID2, RETScreen gibi yazılımları kullanılarak analizler gerçekleştirilebilir ve karar vericiler için geleneksel güneş enerjisi santrali kurma yöntemlerinin geliştirilmesine fayda sağlayacağı düşünülebilir.

Fotovoltaik sistemlerin tasarım aşamalarının oldukça karmaşık olması, çok sayıda değişken parametre içermesi ve tasarımı gerçekleştirecek kişilerin yeterli bilgi ve tecrübeye sahip olmaması gibi nedenlerden dolayı simülasyon destekli çalışmaların yapılması yüksek kurulum maliyeti gerektiren bu sistemlerin uygulama aşamasında hata oranını azaltacaktır. Doğru şekilde yapılacak tasarımlar ile yatırımcılara üretim, performans ve ekonomik analiz değerleri açısından optimum destek sağlanmış olacaktır.

Çalışmadan elde edilen bulguların, Tavşanlı Yerleşkesine kurulması muhtemel bir fotovoltaik güneş enerjisi santraline referans olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Arslan, O., Ozgur, M. A., Kose, R. and Tugcu, A. (2004). Exergoeconomic evaluation on the optimum heating circuit system of Simav geothermal district heating system, *Energy and Buildings*, 41(12), 1325-1333.
- [2] ETBK, T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes>. Erişim tarihi: 21.12.2022
- [3] EİGM. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA), <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator>. Erişim tarihi: 21.12.2022
- [4] TEİAŞ. Türkiye Elektrik İletim A.Ş., Kurulu Güç Raporları (2022 Ekim Basın Bülteni), Erişim Adresi: <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari>. Erişim tarihi: 21.12.2022
- [5] EİGM. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Kütahya İli Güneş Enerjisi Potansiyeli Haritası, <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/43.aspx>. Erişim tarihi: 21.12.2022
- [6] Haydaroğlu, C. ve Gümüş, B. (2016). Dicle Üniversitesi Güneş Enerjisi Santralının Pvsyst ile Simülasyonu ve Performans Parametrelerinin Değerlendirilmesi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, C 7(3), S 491-500.
- [7] Srivastava, R. and Giri, K.V. (2017). Design of Grid Connected PV System Using Pvsyst, *African Journal of Basic & Applied Sciences*, 9(2), 92-96.
- [8] Kumar, M., N., Kumar, R., M., Rejoice, R., P. and Mathew, M. (2017). Performance analysis of 100 kWp grid connected Si-poly photovoltaic system using Pvsyst simulation tool, *Energy Procedia*, 2017, 117, 180-189.
- [9] Özcan, O. ve Ersöz, F. (2019). Project and cost-based evaluation of solar energy performance in three different geographical regions of Turkey: Investment analysis application, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(4), 1098-1106.
- [10] Rawat, M.,R., Chaudhary, V., Dubey, M.,H. and Pandit, M. (2019). Performance Evaluation of 30.5 kWp On-Grid Solar System Using Pvsyst, *International Conference on Sustainable and Innovative Solutions for Current Challenges in Engineering & Technology (ICSISCET 2019)*, 376-378.
- [11] Ramadan, A. and Elistratov, V. (2019). Techno-Economic Evaluation of a Grid-Connected Solar PV Plant in Syria, *Applied Solar Energy*, 55, 174-188.
- [12] Demiryürek, H.K., Arifoğlu U. ve Bolat, M. (2020). Lebit Enerji Güneş Santralinin Pvsyst Programı ile Analizi, *BEU Journal of Science C* 9(3), S 1351-1363.
- [13] Al-Shagea, E., Sezen, S. ve Özdemir, E. (2021). Lisanssız Elektrik Üretiminde Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Sistemlerin Performans Analizi, *International Marmara Sciences Congress (Spring)*, s:209-217.
- [14] Akinsipe, C.O., Moya, D. and Kaporaju, P. (2021). Design and economic analysis of off-grid solar PV system in Jos-Nigeria, *Journal of Cleaner Production*, Volume 287.
- [15] Etcı, A. ve Bilhan, K. A. (2021). PVSyst ile Konya İlinde Sabit ve Çift Eksenli Güneş Takip Sisteminin Modellenmesi, *European Journal of Science and Technology Special Issue C* 32, S 142-147.
- [16] Cura, D., Yılmaz, M., Koten, H., Senthilraja, S. and Awad, M. M. (2022). Evaluation of the technical and economic aspects of solar photovoltaic plants under different climate conditions and feed-in tariff. *Sustainable Cities and Society*, 80, 103804.
- [17] Garip, M., Sulukan, E. and Celiktas, M. S. (2022). Optimization of a grid-connected hybrid energy system: Techno-economic and environmental assessment. *Cleaner Energy Systems*, 3, 100042.

[18] Ayousha E.F.A. and Abdullah, N,M. (2022). Design and Economic Analysis of a Grid-Connected Photovoltaic System in Saudi Arabia using PVsyst Software, Journal of Electronic Voltage and Application, Volume 3 No: 1, 54-68.

[19] ZOREN (2022). Zorlu Enerji Elektrik, Osmangazi Elektrik Perakende Satış A.Ş, Tavşanlı Yerleşkesinin 2022 Yılı Elektrik Tüketim Miktarları ve Fatura Tutarları, Eskişehir.

[20] Erkut, S., Özdemir, E., Koç İ.M., Aktaş, A. ve Erhan K., (2015). Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Elektrik Üretim Sistemlerinin Güç Kalitesine Etkileri ve Performans Analizi. VI. Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu & Sergisi. 4-6 Haziran 2015, Sakarya.

[21] CSIQ, Canadian Solar, <https://www.csisolar.com/module>. Erişim tarihi: 16.10.2022

[22] AOTAI, <http://www.aotaiwelding.com/products/inverter>. Erişim tarihi: 16.10.2022

[23] TCMB, <https://www.tcmb.gov.tr/Istatistikler/Doviz+Kurlari>. Erişim tarihi: 16.11.2022

Çelik ve Karma Taşıyıcı Sistemli Sanayi Bina Örneklerinin Kaba Yapım Maliyetlerinin Trakya Bölgesi için Karşılaştırılması

Hande NURYADI^{1*}, Burak ÖZŞAHİN²

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye

²Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye

Geliş: 13.06.2023, Kabul: 12.12.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

ÖZ

Türkiye konumu itibarıyla dünyanın en etkili deprem kuşaklarından birinin üzerinde bulunmaktadır. Türkiye’de geçmişte birçok yıkıcı deprem yaşandığı gibi gelecekte de yıkıcı depremlerin yaşanması kaçınılmazdır. Türkiye’de nüfusun büyük çoğunluğu, sanayi tesislerinin ve barajların neredeyse tamamı aktif deprem kuşağındadır. Türkiye’de inşa edilecek sanayi binalarının depreme dayanıklı olması ve ilk yapım ile işletme maliyetlerinin düşük olması gerekmektedir.

Türkiye’de sanayi binalarının inşaatında taşıyıcı sistem olarak çelik, betonarme, betonarme prefabrik ve bunların bir arada kullanılmasından oluşan karma sistemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada Türkiye’deki sanayi binalarını temsil edebilecek farklı boyutlara sahip tek açıklıklı ve tek katlı örnek sanayi binaları seçilerek çelik ve karma taşıyıcı sistem için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019’a göre tasarlanmıştır. Türkiye Deprem Tehlike Haritaları 2019’a göre farklı depremselliğe sahip bölgelere (Kırklareli, Edirne, Tekirdağ Çorlu ve İstanbul Beylikdüzü) göre tasarımı yapılan örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyet hesapları yapılmıştır. Çalışmada incelenen örnek sanayi binalarının hesap sonuçlarına göre farklı taşıyıcı sistemler için kaba yapım maliyetleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sanayi Binaları; Çelik Sanayi Binaları; Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği; Kaba Yapım Maliyeti

Comparison of Construction Costs of Industrial Buildings with Steel and Mixed Structural Systems for the Region of Thrace

ABSTRACT

Türkiye is located on one of the most effective earthquake zones in the world due to its location. Just as there have been many devastating earthquakes in the past in Türkiye, it is inevitable that devastating earthquakes will occur in the future. Most of the population, almost all the industrial facilities and dams in Türkiye are in the active seismic zones. The industrial buildings to be built in Türkiye should be earthquake resistant, the construction and operating costs should be low. Steel, reinforced concrete, reinforced concrete prefabricated and mixed systems are used as structural systems in the construction of industrial buildings in Türkiye. In this study, single-span and single-storey industrial buildings with different dimensions, which can represent the industrial buildings in Türkiye, were selected and designed according to the Turkish Building Earthquake Code 2019 for the steel and mixed structural system. The construction cost calculations of industrial buildings designed according to regions with different seismicity according to Turkish Earthquake Hazard Map 2019 (Kırklareli, Edirne, Tekirdağ Çorlu and İstanbul Beylikdüzü) were made. According to the analysis results for the industrial buildings examined in the study, the construction costs for different structural systems were evaluated comparatively.

Keywords: Industrial Structures; Steel Industrial Structures; Turkish Building Earthquake Code; Construction Cost

1. GİRİŞ

Türkiye’de 2023 yılında meydana gelen Kahramanmaraş depreminde (M=7.7 ve M=7.6) birçok şehrimiz ciddi şekilde etkilenmiş, 14500 civarında bina yıkılmış veya ağır hasar almış, yaklaşık 55000 kişi hayatını kaybetmiş ve 50-100 milyar dolar civarında ekonomik kayıp meydana gelmiştir [1]. Benzer şekilde 1999 Sakarya Depremi (M=7,4) ve Düzce Depremi (M=7,2)’nde birçok şehrimiz tahrip olmuş, 15400’e yakın bina yıkılmış, yaklaşık 18000 kişi hayatını kaybetmiş ve 10-25 milyar dolar civarında ekonomik kayıp meydana gelmiştir [2-4]. 2023 Kahramanmaraş, 1999 Adapazarı ve Düzce depremlerinde diğer bina türlerinde olduğu gibi sanayi binalarında da ciddi hasar ve göçme meydana geldiği gözlenmiştir.

İçerisinde önemli makine ve malzeme bulunan sanayi binaları ile depolarında, deprem etkisinde meydana gelen hasarlar sebebiyle ülkelerin sanayi üretimleri ve ekonomileri olumsuz şekilde etkilenmektedir [5]. Bu sebeple, Türkiye’de inşa edilecek sanayi binalarının depreme dayanıklı olması ve ilk yapım ile işletme maliyetlerinin düşük olması gerekmektedir. Ayrıca sanayi yapılarının geniş alanları örtebilmesi, hızlı ve kolay inşa edilebilmesi, ihtiyaç olması durumunda gelecekte büyüyebilme özelliklerine sahip olmaları gerekmektedir. Mimari tasarımın önemli bir adımı olan taşıyıcı sistem seçimi, sahip oldukları sıra dışı açıklıklar ve kat yükseklikleri sebebiyle sanayi binalarında diğer bina türlerine göre çok daha fazla önem kazanmaktadır. Ağır çalışma koşullarına dayanıklı olarak inşa edilen sanayi binalarının ilk yapım maliyetleri, büyük açıklıklar ve kat yükseklikleri nedeniyle genellikle geleneksel yapılara göre daha yüksektir. Taşıyıcı sistem malzemesi ve yapım yöntemi seçimiyle ilgili yapılan araştırmalar sonucu doğru kararın alınarak istenilen niteliklere ve en uygun taşıyıcı sisteme sahip sanayi yapılarının oluşturulması ülke ekonomisi için oldukça önemlidir [6].

Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de deprem yönetmelikleri ile yapısal tasarım standartları, deprem mühendisliği ve yapısal tasarım alanındaki gelişmelere paralel olarak belirli aralıklarla revize edilmekte veya yenilenmektedir. Türkiye’de 18.03.2018 tarihli resmi gazetede yayınlanarak 01.01.2019’da yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019 (TBDY 2019) ile birlikte ülkemizde uzun yıllardan beri kullanılmakta olan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007 (DBYBHY 2007) yürürlükten kaldırılmıştır. TBDY 2019 ile birlikte 1996 yılından beri kullanılmakta olan Deprem Bölgeleri Haritası da yürürlükten kaldırılarak yerine Türkiye Deprem Tehlike Haritaları 2019 (TDTH 2019) yürürlüğe girmiştir [7, 8].

Türkiye’de sanayi yapılarında yaygın olarak kullanılan çelik binalar ile ilgili standart ve yönetmeliklerde de son yıllarda önemli değişiklikler olmuştur. Türkiye’de uzun yıllardan beri çelik yapı tasarımında kullanılan TS 648 Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, 2016 yılında yürürlükten kaldırılmış yerine Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik 2016 (ÇYTHY 2016) yürürlüğe girmiştir.

Türkiye’de yakın geçmişte yürürlüğe giren yapısal tasarım ve deprem yönetmelikleri, diğer bina türlerinde olduğu gibi sanayi binalarında da yapım maliyetini etkileyebilecek düzeyde tasarıma yönelik önemli yenilik ve değişiklikler getirmiştir.

2. SANAYİ BİNALARI

Sanayinin ihtiyaç duyduğu üretim işlemlerinin gerçekleşebilmesi ve üretim ile ilgili gerekli bütün etkinliklerin istenilen koşullar altında yürütülebilmesi için, üretim alanını sınırlayan ve üretim karakterine uygun alanlar sağlayan mekânlardan oluşan yapı ve/veya yapılar grubuna ihtiyaç vardır [9]. Sanayi yapıları, belirli bir üretim sistemi ile bir ürünün üretilmesiyle ilgili eylemler bütünü gerçekleştirildiği üretim mekânlarıdır. Daha geniş anlamda sanayi binası; belirli bir ürünün üretilmesi için bir ulaşım sistemi içinde anapara, çalışan, makina, tesisat, araç, gereç vb. unsurların bağlı oldukları sistemin bir parçası olarak organize edilmesi, kolay, ekonomik ve başarılı bir biçimde işletilmesi amacı ile oluşturulan bir işyeri yapısıdır [9].

Büyük açıklıklara sahip sanayi yapılarında genellikle servis, sirkülasyon ve makine alanları olmak üzere üç farklı mekan düzenlenir. Bu tür yapılarda mesnet açıklıkları kullanılan iş makinaları ve sirkülasyon alanları dikkate alınarak belirlenir [10]. Sanayi binalarının geniş alanları örtebilmeleri, hızlı ve kolay inşa edilebilmeleri, gelecekte ihtiyaç duyulması durumunda büyüyebilme özelliklerine sahip, Türkiye gibi depremselliği fazla olan ülkelerde depreme dayanıklı olmaları gerekmektedir. Sanayi binalarının ilk yapım maliyetleri geçilen açıklıklar ve kat yükseklikleri sebebiyle diğer bina türlerine göre yüksek olup, sanayi binalarının taşıyıcı sistem, taşıyıcı sistem malzemesi ve yapım yönteminin ekonomik olarak uygulanabilir olması önemlidir [6]. Sanayi ve endüstri faaliyetlerinin yürütüldüğü bu tür yapılar, üretim odaklı olduğundan içerisinde çok farklı süreçleri barındırır. Bir sanayi tesisi tasarlanmadan önce yatırımcı, mimar ve mühendislerin iş birliği neticesinde sürece yönelik program hazırlanmalıdır. Yapının kullanım amacı ne olursa olsun ön projelendirme safhasında ihtiyaçlar net bir şekilde belirlenip, kategorize edilerek ilişkilendirilmelidir. Sanayi yapılarının plan içinde düzenlenmesi için verimlilik ilkesine bağlı olarak taşıyıcı sistem için estetik, ekonomik ve yeterli dayanıma sahip yapı malzemeleri seçilmelidir [11]. Türkiye’de ve dünyada sanayi yapılarının taşıyıcı sistemleri, taşıyıcı sistem malzemeleri bakımından; çelik sanayi yapıları, betonarme prefabrik sanayi yapıları, betonarme sanayi yapıları ve karma sanayi yapıları olarak dörde ayrılmaktadır [12].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada sanayi binalarının taşıyıcı sistem türünün bina kaba yapım maliyetine etkisinin görülmesi amacıyla tek katlı, tek açıklıklı çelik ve çelik-betonarme karma taşıyıcı sistemli sanayi bina örnekleri farklı yerel zemin sınıfları için TBDY 2019 ve ÇYTHY 2018'e göre tasarlanarak kaba yapım maliyetleri projeler üzerinden hesaplanmıştır. Çelik ve çelik-betonarme karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının yapısal analizlerinde İdeStatik v10.1 ve SAP 2000 v22 programları kullanılmıştır [12-14].

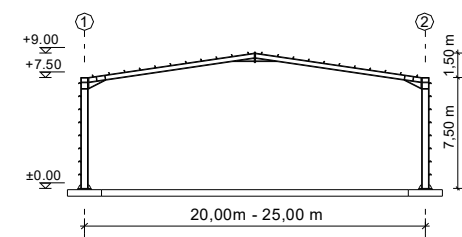
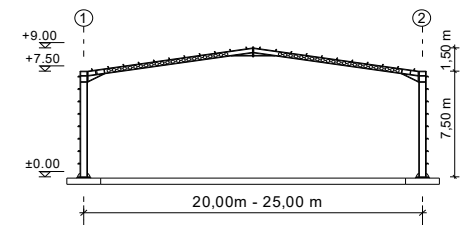
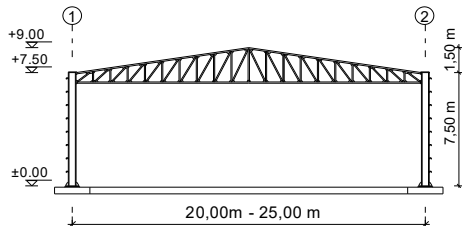
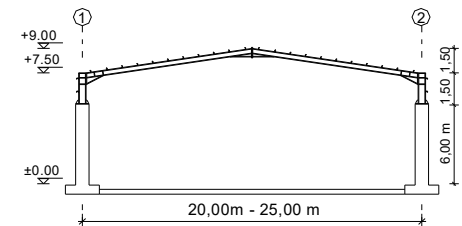
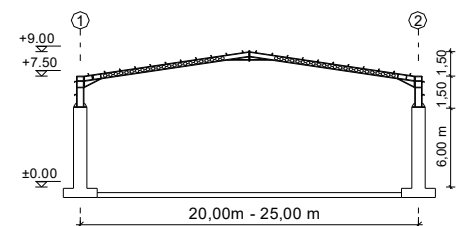
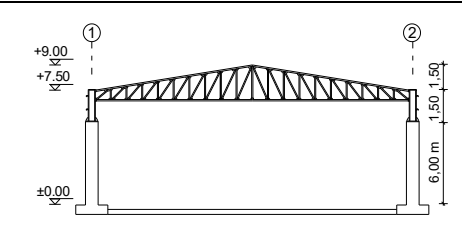
3.1. Örnek sanayi binalarının geometrik bilgileri

Bu çalışmada incelenen sanayi bina modellerinde açıklıklar, makasa paralel yönde 20,00-25,00 m ve makaslara dik yönde 6,00 m olarak öngörülmüştür. Sanayi binaları makaslara paralel yönde bir açıklıklı, makaslara dik yönde yedi açıklıklı olup, bina yüksekliği 9,0 m ve serbest bina yüksekliği 7,50 m'dir. Bu ölçülere bağlı olarak incelenen sanayi binalarının boyutları 20,00m×42,00m ve 25,00m×42,00m'dir. Çalışmada çelik ve karma taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının çatı kirişleri; dolu gövdeli kiriş, altıgen petek kiriş ve kafes kirişli olarak tasarlanmıştır. Dolu gövdeli kiriş çatı makası, altıgen petek kiriş çatı makası, kafes kiriş çatı makası çelik taşıyıcı sistemli ve karma taşıyıcı sistemli örnek sanayi binaları Çizelge 1 'de, örnek sanayi binası modellerinin tasarım parametreleri Çizelge 2 'de verilmiştir.

3.2. Çalışmada incelenen bölgeler

Örnek sanayi binalarının tasarım ve maliyet hesapları sanayi tesislerinin yoğun olarak bulunduğu, farklı depremselliğe sahip Kırklareli, Edirne, Tekirdağ Çorlu ve İstanbul Beylikdüzü Organize Sanayi Bölgeleri için ayrı ayrı yapılmıştır. İncelenen bölgelerin deprem tasarım parametreleri Türkiye Deprem Tehlike Haritaları 2019 (TDTH 2019)'dan okunmuştur (Şekil 1).

Çizelge 1: Çalışmada incelenen çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi bina modelleri

Model Adı	Taşıyıcı Sistem Malzemesi	Çatı Makası Türü	Kesit
Dolu Gövdeli Kiriş Çatı Makaslı Çelik Taşıyıcı Sistem	Çelik	Dolu Gövdeli Kiriş	
Petek Kiriş Çatı Makaslı Çelik Taşıyıcı Sistem	Çelik	Altıgen Gözlü Petek Kiriş	
Kafes Kiriş Çatı Makaslı Çelik Taşıyıcı Sistem	Çelik	Çift L Profilli Trapez Kafes Kiriş	
Dolu Gövdeli Kiriş Çatı Makaslı Çelik Taşıyıcı Sistem	Karma	Dolu Gövdeli Kiriş	
Petek Kiriş Çatı Makaslı Çelik Taşıyıcı Sistem	Karma	Altıgen Gözlü Petek Kiriş	
Kafes Kiriş Çatı Makaslı Çelik Taşıyıcı Sistem	Karma	Çift L Profilli Trapez Kafes Kiriş	

Çalışmada incelenen organize sanayi bölgelerinin TDTH 2019’dan okunan deprem parametreleri Çizelge 3-6’da verilmiştir.

Çizelge 3: Kırklareli Organize Sanayi Bölgesi deprem parametreleri [12]

DD	YZS	P _{GA} (g)	P _{GV} (cm/s)	S _s (-)	S ₁ (-)	S _{DS} (-)	S _{D1} (-)	T _A (s)	T _B (s)	T _L (s)
DD2	ZA	0,171	11,489	0,403	0,132	0,322	0,106	0,066	0,328	6,0
	ZB	0,171	11,489	0,403	0,132	0,363	0,106	0,058	0,291	6,0
	ZC	0,171	11,489	0,403	0,132	0,524	0,198	0,076	0,378	6,0
	ZD	0,171	11,489	0,403	0,132	0,595	0,308	0,104	0,518	6,0
	ZE	0,171	11,489	0,403	0,132	0,795	0,516	0,130	0,650	6,0
DD3	ZA	0,061	4,679	0,141	0,055	0,113	0,044	0,078	0,390	6,0
	ZB	0,061	4,679	0,141	0,055	0,127	0,044	0,069	0,347	6,0
	ZC	0,061	4,679	0,141	0,055	0,183	0,082	0,090	0,450	6,0
	ZD	0,061	4,679	0,141	0,055	0,226	0,132	0,117	0,585	6,0
	ZE	0,061	4,679	0,141	0,055	0,338	0,231	0,137	0,683	6,0

Çizelge 4: Edirne Organize Sanayi Bölgesi deprem parametreleri [12]

DD	YZS	P _{GA} (g)	P _{GV} (cm/s)	S _s (-)	S ₁ (-)	S _{DS} (-)	S _{D1} (-)	T _A (s)	T _B (s)	T _L (s)
DD2	ZA	0,165	10,764	0,390	0,123	0,312	0,098	0,063	0,315	6,0
	ZB	0,165	10,764	0,390	0,123	0,351	0,098	0,056	0,280	6,0
	ZC	0,165	10,764	0,390	0,123	0,507	0,185	0,073	0,364	6,0
	ZD	0,165	10,764	0,390	0,123	0,580	0,290	0,100	0,499	6,0
	ZE	0,165	10,764	0,390	0,123	0,783	0,491	0,125	0,627	6,0
DD3	ZA	0,056	4,298	0,126	0,050	0,101	0,040	0,079	0,397	6,0
	ZB	0,056	4,298	0,126	0,050	0,113	0,040	0,071	0,353	6,0
	ZC	0,056	4,298	0,126	0,050	0,164	0,075	0,092	0,458	6,0
	ZD	0,056	4,298	0,126	0,050	0,202	0,120	0,119	0,595	6,0
	ZE	0,056	4,298	0,126	0,050	0,302	0,210	0,139	0,694	6,0

Çizelge 5: Tekirdağ Çorlu Organize Sanayi Bölgesi deprem parametreleri [12]

DD	YZS	P _{GA} (g)	P _{GV} (cm/s)	S _s (-)	S ₁ (-)	S _{DS} (-)	S _{D1} (-)	T _A (s)	T _B (s)	T _L (s)
DD2	ZA	0,330	20,570	0,798	0,221	0,683	0,177	0,055	0,277	6,0
	ZB	0,330	20,570	0,798	0,221	0,718	0,177	0,049	0,246	6,0
	ZC	0,330	20,570	0,798	0,221	0,958	0,331	0,069	0,346	6,0
	ZD	0,330	20,570	0,798	0,221	0,942	0,477	0,101	0,506	6,0
	ZE	0,330	20,570	0,798	0,221	1,007	0,706	0,143	0,701	6,0
DD3	ZA	0,120	7,898	0,283	0,086	0,226	0,069	0,061	0,304	6,0
	ZB	0,120	7,898	0,283	0,086	0,255	0,069	0,054	0,270	6,0
	ZC	0,120	7,898	0,283	0,086	0,368	0,129	0,070	0,351	6,0
	ZD	0,120	7,898	0,283	0,086	0,445	0,206	0,093	0,463	6,0
	ZE	0,120	7,898	0,283	0,086	0,653	0,361	0,111	0,553	6,0

Çizelge 6: İstanbul Beylikdüzü Organize Sanayi Bölgesi deprem parametreleri [12]

DD	YZS	P _{GA} (g)	P _{GV} (cm/s)	S _S (-)	S ₁ (-)	S _{DS} (-)	S _{D1} (-)	T _A (s)	T _B (s)	T _L (s)
DD2	ZA	0,506	30,533	1,241	0,334	0,993	0,267	0,054	0,269	6,0
	ZB	0,506	30,533	1,241	0,334	1,117	0,267	0,048	0,239	6,0
	ZC	0,506	30,533	1,241	0,334	1,489	0,501	0,067	0,336	6,0
	ZD	0,506	30,533	1,241	0,334	1,245	0,657	0,105	0,527	6,0
	ZE	0,506	30,533	1,241	0,334	1,126	0,890	0,158	0,790	6,0
DD3	ZA	0,191	11,793	0,450	0,118	0,360	0,094	0,052	0,262	6,0
	ZB	0,191	11,793	0,450	0,118	0,405	0,094	0,047	0,233	6,0
	ZC	0,191	11,793	0,450	0,118	0,585	0,177	0,061	0,303	6,0
	ZD	0,191	11,793	0,450	0,118	0,648	0,279	0,086	0,430	6,0
	ZE	0,191	11,793	0,450	0,118	0,828	0,476	0,115	0,575	6,0

Çalışmada incelenen bölgelerin zemin etüdü değerleri bulunmadığı için örnek sanayi binalarının tasarımları TBDY 2019’da tanımlanan ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE zemin sınıfları için ayrı ayrı yapılmıştır. Örnek sanayi binalarının tasarımında zemin taşıma güçleri ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE zemin sınıfları için sırasıyla 100, 150, 200, 250, 300 kN/m² alınmıştır. Çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarında betonarme tekil temel tasarlanmıştır. Tasarımda temellerin zemin sıfır kotundan en az 50 cm aşağıda olduğu, temellerin her iki yönde birbirine bağ kirişleri ile bağlandığı kabul edilmiştir. Zemin durumuna bağlı derin temel kullanılması veya zemin güçlendirilmesi gereken haller ile sanayi üretimine has makine ve ekipman için özel temel tasarımları çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.

3.3. Taşıyıcı sistem bilgileri

Çalışmada Türkiye’de sanayi binalarında yaygın kullanıma sahip çelik ve karma taşıyıcı sistemler incelenmiş, betonarme prefabrik binaların imalat boyutları ve yapım maliyetleri üretici firmalara göre değişim gösterdiği için kapsam dışında tutulmuştur. Çelik yapı taşıyıcı sistemlerinde sıcak şekillendirilmiş yapısal çelik elemanlar ile soğuk şekillendirilmiş elemanlar kullanılmaktadır. Türkiye’de çelik sanayi binalarında sıcak şekillendirilmiş yapısal çelik taşıyıcı sistem elemanları daha yaygın kullanıldığı için çalışmada bu sistemler incelenmiş, soğuk şekillendirilmiş taşıyıcı sistem elemanlarının kullanıldığı hafif çelik sanayi binaları kapsam dışı bırakılmıştır.

Çelik taşıyıcı sisteme sahip sanayi bina modellerinde kolonların temellere ankastre mesnetlendiği, makas yönünde çatı ile kolon birleşimlerinin rijit ve makasa dik yönde mafsalı olduğu kabul edilmiştir. Yapısal hesaplarda taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) ve dayanım fazlalığı katsayısı (D) TBDY 2019’a göre çerçeve yönünde deprem etkilerinin tamamının moment aktaran süneklik düzeyi yüksek çelik çerçevelerle karşılandığı binalar için R=8, D=3 ve çerçeveye dik yönde ise deprem etkilerinin tamamının süneklik düzeyi yüksek merkezi çaprazlı çelik çerçeveler tarafından karşılandığı binalar için R=5, D=2 seçilmiştir [16].

Çelik sanayi binalarında temeller dışındaki tüm taşıyıcı sistem elemanlarında S235 malzeme sınıfında sıcak şekillendirilmiş profillerin kullanıldığı kabul edilmiştir.

Yerinde dökme betonarme taşıyıcı sistem ile çelik taşıyıcı sistemin bir arada kullanıldığı karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarında deprem etkisinde her iki yöndeki davranışı benzer olan kare betonarme kolonlar ile çelik çatı makasların kullanıldığı kabul edilmiştir. Karma (betonarme+çelik) taşıyıcı sisteme sahip sanayi bina modellerinde kolonların temellere ankastre mesnetlendiği, makas yönünde çatı ile kolon birleşimlerinin rijit ve makasa dik yönde mafsalı olduğu kabul edilmiştir. Yapısal hesaplarda taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) ve dayanım fazlalığı katsayısı (D) TBDY 2019'a göre çerçeve yönünde deprem etkilerinin tamamının moment aktaran süneklik düzeyi yüksek karma çerçevelerle karşılandığı binalar için R=8, D=3 ve çerçeveye dik yönde ise deprem etkilerinin tamamının süneklik düzeyi yüksek merkezi çaprazlı karma çerçeveler tarafından karşılandığı binalar için R=5, D=2 seçilmiştir [16]. Karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının betonarme bölümlerinde C25/30 beton ve B420C donatı çeliği, çelik bölümlerinde ise S235 çeliği kullanıldığı kabul edilmiştir.

Tüm taşıyıcı sistemlerin tasarımında çatı kaplaması olarak poliüretan yalıtımlı kompozit panel kullanılmış, çatı eğimi %15 alınmıştır. Sanayi binalarının taşıyıcı sistem tasarımı yürürlükteki deprem yönetmeliği TBDY 2019 ile ÇYTHYEY 2018, TS 500 ve TS 498 standartlarına göre yapılmıştır [16-19]. Örnek sanayi binalarına etki eden deprem yükleri TBDY 2019'a göre beş farklı yerel zemin sınıfı için hesaplanırken rüzgâr yükleri TS 498'e göre hesaplanmış, kar yükü TS 498'e göre 0,75 kN/m² alınmış ve binalara etki ettirilmiştir.

4. ÖRNEK SANAYİ BİNALARININ KABA YAPIM MALİYETLERİ

Aynı plan boyutlu farklı taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının Kırklareli, Edirne, Tekirdağ Çorlu ve İstanbul Beylikdüzü Organize Sanayi Bölgeleri için kaba yapım maliyet farklarını ortaya koymak için maliyet hesaplarında taşıyıcı sistemlerdeki ortak imalatlar yerine farklı imalatlar dikkate alınmıştır. Böylece örnek sanayi binaları için taşıyıcı sistem türlerinin maliyet farkları dikkate alınarak en ekonomik sanayi binası taşıyıcı sistemi belirlenmeye çalışılmıştır. Örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyet hesaplarında dikkate alınan imalat kalemleri özet olarak Çizelge 7'de verilmiştir. Örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyet hesaplarında T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2022/3 İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları'ndan yararlanılmıştır [20].

Çizelge 7: Kaba yapım maliyeti hesabında dikkate alınan imalatlar ve birim fiyatları [20]

Poz Numarası	Tanımı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)
15.150.1005	Beton santralinde üretilen veya satın alınan ve beton pompasıyla basılan C25/30 hazır beton	m ³	1.046,16
15.160.1003	Ø8-Ø12 mm nervürlü beton çelik çubuğu, çubukların kesilmesi, bükülmesi ve yerine konulması	ton	19.325,13
15.160.1004	Ø14-Ø28 mm nervürlü beton çelik çubuğu, çubukların kesilmesi, bükülmesi ve yerine konulması	ton	19.290,13
15.165.1001	Her türlü profil demirlerin münferit veya birleşik olarak hazırlanması ve yerine tespit edilmesi	ton	27.424,96
15.180.1003	Plywood ile düz yüzeyle betonarme kalıbı yapılması	m ²	173,93
15.540.1113	Demir yüzeylere iki kat solvent bazlı epoksi boya yapılması	m ²	76,04
19.100.1113	Mobil vinç'in 1 saatlik ücreti	sa	382,79
15.220.1113	175 mm kalınlığında düşey delikli tuğla (240x175x235 mm) ile duvar yapılması	m ²	205,70
15.100.1004	1 ton her cins betonarme demiri, profil ve lama demiri ile sacların taşıtlara yükleme, boşaltma ve istifi	ton	47,85

4.1. Örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyetleri

TBDY 2019 ve ÇYTHYEY 2018'e göre farklı zemin sınıfları için tasarımları yapılan farklı taşıyıcı sisteme sahip örnek sanayi binalarının projeler üzerinden hesaplanan kaba yapım maliyet sonuçları aşağıda özet olarak verilmiştir.

4.1.1. Çelik taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyetleri

TBDY 2019'daki farklı zemin sınıfları ve TDTH 2019'a göre tasarımları yapılan 20 m açıklıklı çelik taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının m² cinsinden kaba yapım maliyetleri Çizelge 8'de, 25 m açıklıklı çelik taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının m² cinsinden kaba yapım maliyetleri Çizelge 9'da verilmiştir.

Çizelge 8: 20,00 m×42,00m boyutlu örnek çelik taşıyıcı sistemli sanayi binalarının m² kaba yapım maliyetleri (TL/m²) (Nuryadı, 2023'ten düzenlenmiştir) [12]

Bina Konumu	Model Adı	Yerel Zemin Sınıfı				
		ZA	ZB	ZC	ZD	ZE
Kırklareli OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	3355,62	3356,03	3422,84	3428,01	3507,38
	Petek Kirişli	3267,65	3267,65	3322,84	3323,95	3399,74
	Kafes Kirişli	3205,92	3205,92	3267,81	3271,16	3324,70
Edirne OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	3355,62	3356,03	3422,82	3428,73	3507,42
	Petek Kirişli	3267,60	3267,60	3317,68	3321,12	3395,83
	Kafes Kirişli	3205,92	3205,92	3264,89	3268,36	3321,43
Tekirdağ Çorlu OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	3421,35	3421,77	3468,83	3483,29	3803,34
	Petek Kirişli	3317,00	3317,00	3383,83	3395,75	3735,50
	Kafes Kirişli	3256,09	3256,09	3358,41	3370,26	3658,89
İstanbul Beylikdüzü OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	3537,59	3537,59	3623,68	3859,37	4024,26
	Petek Kirişli	3459,41	3459,41	3568,54	3812,16	4005,34
	Kafes Kirişli	3316,68	3316,68	3520,95	3751,84	3936,14

Çizelge 9: 25,00 m×42,00m boyutlu örnek çelik taşıyıcı sistemli sanayi binalarının m² kaba yapım maliyetleri (TL/m²) (Nuryadı, 2023'ten düzenlenmiştir) [12]

Bina Konumu	Model Adı	Yerel Zemin Sınıfı				
		ZA	ZB	ZC	ZD	ZE
Kırklareli OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	3365,31	3381,77	3412,22	3440,15	3492,58
	Petek Kirişli	3290,12	3299,65	3329,90	3355,42	3449,02
	Kafes Kirişli	3080,35	3080,35	3134,76	3154,08	3229,69
Edirne OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	3365,31	3370,94	3401,74	3429,64	3482,69
	Petek Kirişli	3290,12	3295,89	3325,40	3350,92	3443,65
	Kafes Kirişli	3080,35	3080,35	3128,23	3146,78	3222,24
Tekirdağ Çorlu OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	3450,46	3461,41	3483,20	3574,50	3765,19
	Petek Kirişli	3353,88	3353,88	3419,52	3469,86	3636,16
	Kafes Kirişli	3215,69	3215,69	3331,68	3365,12	3568,76
İstanbul Beylikdüzü OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	3508,58	3058,58	3530,10	3916,35	4579,23
	Petek Kirişli	3441,06	3441,06	3474,80	3781,96	4207,35
	Kafes Kirişli	3371,92	3371,92	3409,86	3674,92	4044,23

4.1.2. Karma taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyetleri

TBDY 2019'daki farklı zemin sınıfları ve TDTH 2019'a göre tasarımları yapılan 20 m açıklıklı karma taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının m² cinsinden kaba yapım maliyetleri Çizelge 10'da, 25 m açıklıklı karma taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının m² cinsinden kaba yapım maliyetleri Çizelge 11'de verilmiştir.

Çizelge 10: 20,00 m×42,00m boyutlu örnek karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının m² kaba yapım maliyetleri (TL/m²) (Nuryadı, 2023'ten düzenlenmiştir) [12]

Bina Konumu	Model Adı	Yerel Zemin Sınıfı				
		ZA	ZB	ZC	ZD	ZE
Kırklareli OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	2084,57	2084,57	2113,58	2118,77	2186,47
	Petek Kirişli	2030,02	2033,76	2046,36	2053,42	2146,54
	Kafes Kirişli	1986,23	1991,74	2003,90	2014,77	2066,54
Edirne OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	2084,57	2084,57	2113,58	2118,77	2186,58
	Petek Kirişli	2030,02	2033,76	2047,88	2053,07	2144,67
	Kafes Kirişli	1986,23	1991,74	2003,90	2014,77	2066,54
Tekirdağ Çorlu OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	2123,58	2123,58	2147,73	2154,37	2426,71
	Petek Kirişli	2061,12	2064,87	2084,17	2089,36	2318,27
	Kafes Kirişli	2010,17	2015,68	2016,55	2087,68	2238,37
İstanbul Beylikdüzü OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	2123,58	2123,58	2147,73	2242,82	2504,99
	Petek Kirişli	2061,12	2064,85	2084,17	2224,68	2378,78
	Kafes Kirişli	2011,47	2015,68	2016,55	2167,89	2312,54

Çizelge 11: 25,00 m×42,00m boyutlu örnek karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının m² kaba yapım maliyetleri (TL/m²) (Nuryadı, 2023'ten düzenlenmiştir) [12]

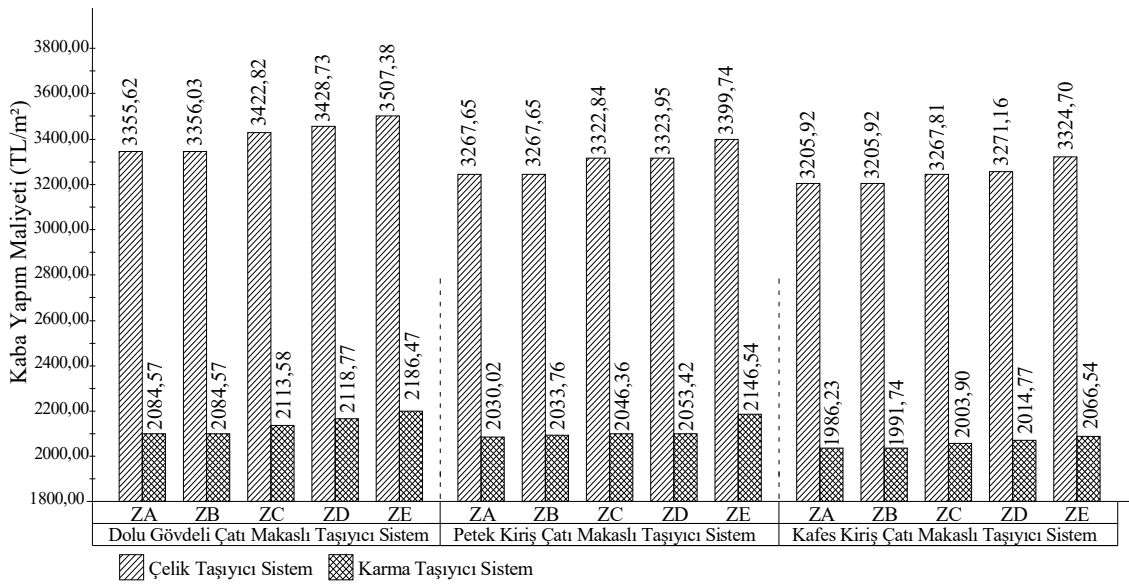
Bina Konumu	Model Adı	Yerel Zemin Sınıfı				
		ZA	ZB	ZC	ZD	ZE
Kırklareli OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	2102,25	2102,25	2118,93	2130,88	2209,14
	Petek Kirişli	2083,88	2090,35	2099,13	2108,90	2198,44
	Kafes Kirişli	2029,33	2029,33	2045,96	2053,51	2081,73
Edirne OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	2102,25	2102,25	2118,93	2130,88	2209,14
	Petek Kirişli	2083,88	2090,35	2099,13	2108,90	2198,44
	Kafes Kirişli	2029,33	2029,33	2045,96	2053,51	2081,79
Tekirdağ Çorlu OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	2207,04	2210,98	2247,13	2283,97	2554,25
	Petek Kirişli	2098,82	2107,65	2147,80	2162,89	2460,29
	Kafes Kirişli	2048,16	2048,16	2072,67	2121,57	2359,24
İstanbul Beylikdüzü OSB	Dolu Gövdeli Kirişli	2265,16	2268,87	2322,34	2464,11	2675,62
	Petek Kirişli	2127,88	2144,40	2295,53	2367,34	2623,25
	Kafes Kirişli	2068,09	2077,22	2101,73	2343,16	2506,88

4.2. Örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin karşılaştırılması

Kırklareli OSB için 20,00m×42,00m plan boyutlu farklı taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının m² cinsinden kaba yapım maliyetleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 12'de verilmiştir. Çelik taşıyıcı sistemli ve karma taşıyıcı sistemli 20,00m×42,00m plan boyutlu örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin değişiminin kolaylıkla yorumlanabilmesi için Çizelge 12'deki maliyet sonuçları grafik olarak Şekil 2'de verilmiştir.

Çizelge 12: Kırklareli OSB için 20,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi bina maliyetlerinin karşılaştırılması [12]

Yerel Zemin Sınıfı	Çelik Taşıyıcı Sistem (TL/m ²)			Karma Taşıyıcı Sistem (TL/m ²)			Karma/Çelik Taşıyıcı Sistem Maliyet Oranları (%)		
	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli
ZA	3355,62	3267,65	3205,92	2084,57	2030,02	1986,23	62,1	62,1	62,0
ZB	3356,03	3267,65	3205,92	2084,57	2033,76	1991,74	62,1	62,2	62,1
ZC	3422,82	3322,84	3267,81	2113,58	2046,36	2003,90	61,7	61,6	61,3
ZD	3428,73	3323,95	3271,16	2118,77	2053,42	2014,77	61,8	61,8	61,6
ZE	3507,38	3399,74	3324,70	2186,47	2146,54	2066,54	62,3	63,1	62,2

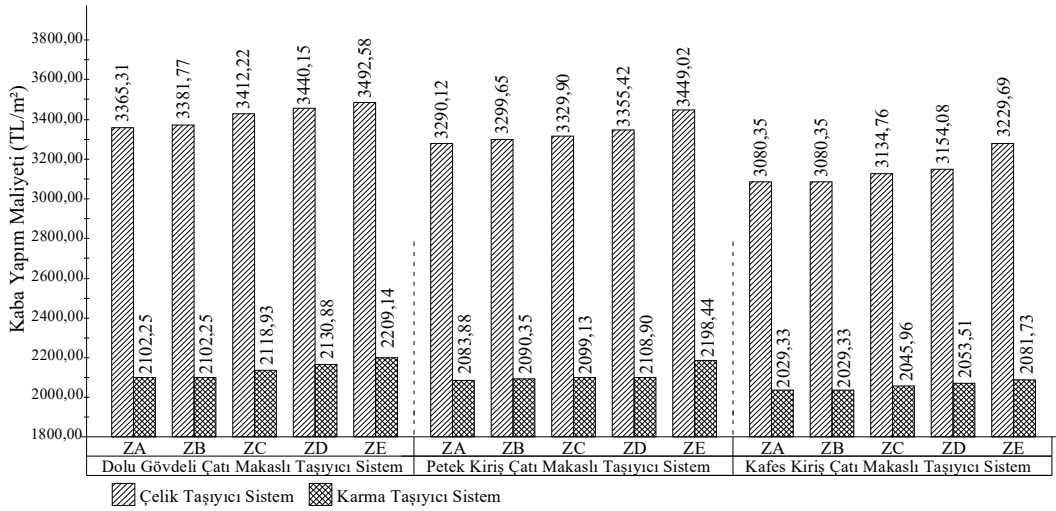


Şekil 2: Kırklareli OSB için 20,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının karşılaştırmalı kaba yapım maliyetleri [12]

Kırklareli OSB için 25.00m×42.00m plan boyutlu farklı taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının m² cinsinden kaba yapım maliyetleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 13’de verilmiştir. Çelik taşıyıcı sistemli ve karma taşıyıcı sistemli 25.00m×42.00m plan boyutlu örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin değişimin kolaylıkla yorumlanabilmesi için Çizelge 13’teki maliyet sonuçları grafik olarak Şekil 3’te verilmiştir.

Çizelge 13: Kırklareli OSB için 25,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi bina maliyetlerinin karşılaştırılması [12]

Yerel Zemin Sınıfı	Çelik Taşıyıcı Sistem (TL/m ²)			Karma Taşıyıcı Sistem (TL/m ²)			Karma/Çelik Taşıyıcı Sistem Maliyet Oranları (%)		
	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli
ZA	3365,31	3290,12	3080,35	2102,25	2083,88	2029,33	59,8	63,3	65,9
ZB	3381,77	3299,65	3080,35	2102,25	2090,35	2029,33	62,2	63,4	65,9
ZC	3412,22	3329,90	3134,76	2118,93	2099,13	2045,96	62,1	63,0	65,3
ZD	3440,15	3355,42	3154,08	2130,88	2108,90	2053,51	61,9	62,9	65,1
ZE	3492,58	3449,02	3229,69	2209,14	2198,44	2081,73	63,3	63,7	64,5



Şekil 3: Kırklareli OSB için 25,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının karşılaştırmalı kaba yapım maliyetleri [12]

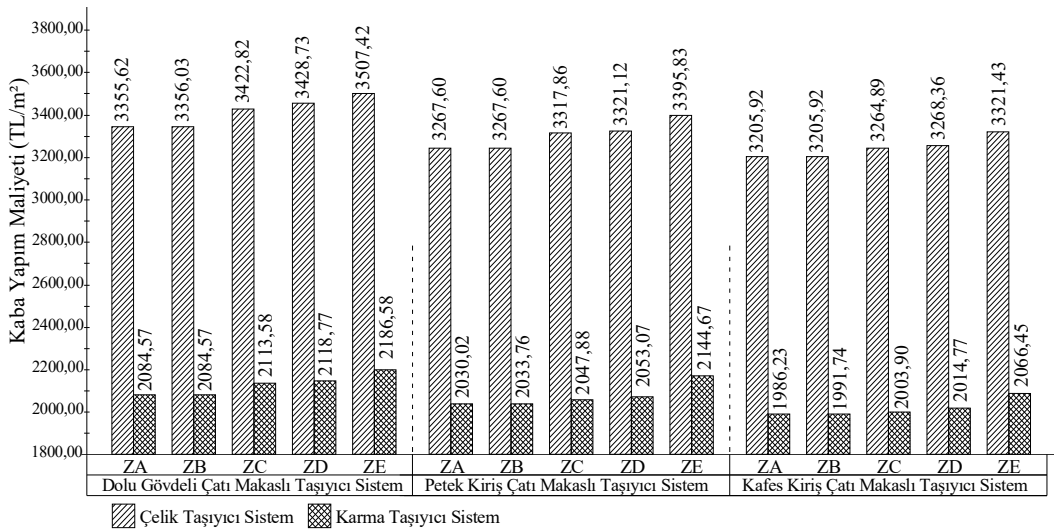
Çizelge 12-13 ve Şekil 2-3'e göre Kırklareli OSB için verilen sanayi binası m² kaba yapım maliyetleri incelendiğinde çelik taşıyıcı sistem ve karma taşıyıcı sistemli sanayi bina örneklerinin tamamında en ekonomik taşıyıcı sistem türünün kafes kiriş çatı makaslı taşıyıcı sistem olduğu, onu sırasıyla petek kiriş çatı makaslı sistem ile dolu gövdeli kiriş çatı makaslı sistemin takip ettiği görülmektedir. Kırklareli OSB için karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetleri, çelik taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinden daha düşüktür. 20,00m×42,00m plan boyutlu örnek bina modellerinde; karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin çelik taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerine oranı, dolu gövdeli kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %62,0; petek kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %62,2 ve kafes kiriş çatı makaslı sistemlerde %61,8'dir

(Çizelge 12). 25,00m×42,00m plan boyutlu örnek bina modellerinde karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin çelik taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerine oranı dolu gövdeli kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %61,9; petek kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %63,3 ve kafes kiriş çatı makaslı sistemlerde %65,3'tür (Çizelge 13). Kırklareli OSB için çelik ve karma taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının tamamında taşıyıcı sistem maliyetlerinin ZA yerel zemin sınıfından ZE yerel zemin sınıfına gidildikçe arttığı görülmektedir.

Edirne OSB için 20,00m×42,00m plan boyutlu farklı taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının m² cinsinden kaba yapım maliyetleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 14'te verilmiştir. Çelik taşıyıcı sistemli ve karma taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin değişiminin kolaylıkla yorumlanabilmesi için Çizelge 14'teki maliyet sonuçları grafik olarak Şekil 4'te verilmiştir.

Çizelge 14: Edirne OSB için 20,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi bina maliyetlerinin karşılaştırılması [12]

Yerel Zemin Sınıfı	Çelik Taşıyıcı Sistem (TL/m ²)			Karma Taşıyıcı Sistem (TL/m ²)			Karma/Çelik Taşıyıcı Sistem Maliyet Oranları (%)		
	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli
ZA	3355,62	3267,60	3205,92	2084,57	2030,02	1986,23	62,2	62,1	62,0
ZB	3356,03	3267,60	3205,92	2084,57	2033,76	1991,74	62,1	62,2	62,1
ZC	3422,82	3317,68	3264,89	2113,58	2047,88	2003,90	61,7	61,7	61,4
ZD	3428,73	3321,12	3268,36	2118,77	2053,07	2014,77	61,8	61,8	61,6
ZE	3507,42	3395,83	3321,43	2186,92	2144,67	2066,54	62,4	63,2	62,2

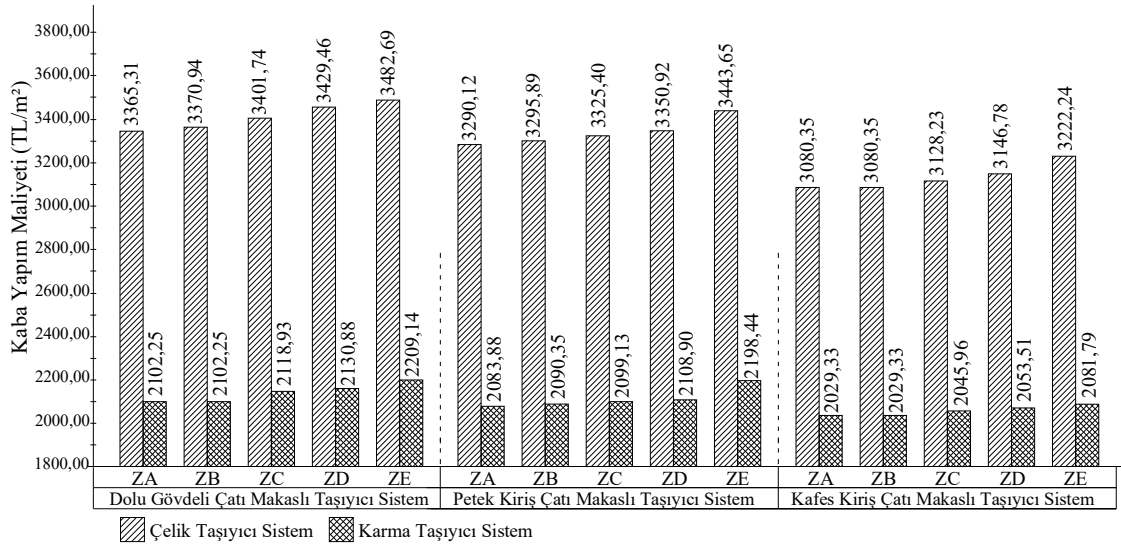


Şekil 4: Edirne OSB için 20,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının karşılaştırmalı kaba yapım maliyetleri [12]

Edirne OSB için 25,00m×42,00m plan boyutlu farklı taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının m² cinsinden kaba yapım maliyetleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 15'te verilmiştir. Çelik taşıyıcı sistemli ve karma taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin değişiminin kolaylıkla yorumlanabilmesi için Çizelge 15'teki maliyet sonuçları grafik olarak Şekil 5'te verilmiştir.

Çizelge 15: Edirne OSB için 25,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi bina maliyetlerinin karşılaştırılması [12]

Yerel Zemin Sınıfı	Çelik Taşıyıcı Sistem (TL/m ²)			Karma Taşıyıcı Sistem (TL/m ²)			Karma/Çelik Taşıyıcı Sistem Maliyet Oranları (%)		
	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli
ZA	3365,31	3290,12	3080,35	2102,25	2083,88	2029,33	62,5	63,3	65,9
ZB	3370,94	3295,89	3080,35	2102,25	2090,35	2029,33	62,4	63,4	65,9
ZC	3401,74	3325,40	3128,23	2118,93	2099,13	2045,96	62,3	63,1	65,4
ZD	3429,80	3350,92	3146,78	2130,88	2108,90	2053,51	62,1	62,9	65,3
ZE	3482,69	3443,65	3222,24	2209,14	2198,44	2081,79	63,4	63,8	64,6



Şekil 5: Edirne OSB için 25,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının karşılaştırmalı kaba yapım maliyetleri [12]

Çizelge 14-15 ve Şekil 4-5'e göre Edirne OSB için verilen sanayi binası m² kaba yapım maliyetleri incelendiğinde çelik taşıyıcı sistem ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binası örneklerinin tamamında en ekonomik taşıyıcı sistem türünün kafes kiriş çatı makaslı taşıyıcı sistem olduğu, onu sırasıyla petek kiriş çatı makaslı sistem ile dolu gövdeli kiriş çatı makaslı sistemin takip ettiği görülmektedir. Edirne OSB için karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetleri, çelik taşıyıcı sistemli sanayi binalarının

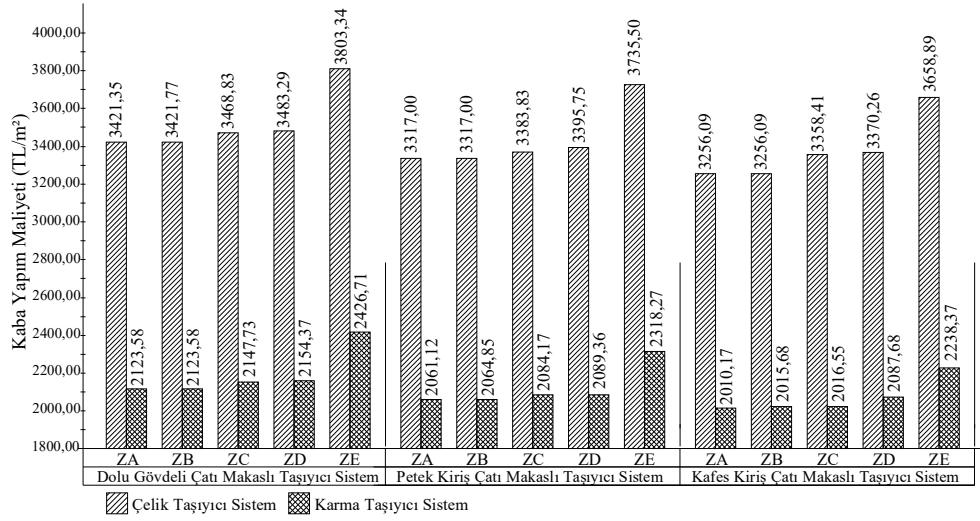
kaba yapım maliyetlerinden daha düşüktür. 20,00m×42,00m boyutlu örnek bina modellerinde karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin çelik taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerine oranı, dolu gövdeli kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %62,0; petek kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %62,2 ve kafes kiriş çatı makaslı sistemlerde %61,9'dur (Çizelge 14). 25,00m×42,00m boyutlu örnek bina modellerinde karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin çelik taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerine oranı dolu gövdeli kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %62,5; petek kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %63,3 ve kafes kiriş çatı makaslı sistemlerde %65,4'tür (Çizelge 15). Edirne OSB için çelik ve karma taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının tamamında taşıyıcı sistem maliyetlerinin ZA yerel zemin sınıfından ZE yerel zemin sınıfına gidildikçe arttığı görülmektedir.

Tekirdağ Çorlu OSB için 20,00m×42,00m plan boyutlu farklı taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının m² cinsinden kaba yapım maliyetleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 16'da verilmiştir. Çelik taşıyıcı sistemli ve karma taşıyıcı sistemli 20,00m×42,00m plan boyutlu örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin değişiminin kolaylıkla yorumlanabilmesi için Çizelge 16'daki maliyet sonuçları grafik olarak Şekil 6'da verilmiştir.

Çizelge 16: Tekirdağ Çorlu OSB için 20,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi bina maliyetlerinin karşılaştırılması [12]

Yerel Zemin Sınıfı	Çelik Taşıyıcı Sistem (TL/m ²)			Karma Taşıyıcı Sistem (TL/m ²)			Karma/Çelik Taşıyıcı Sistem Maliyet Oranları (%)		
	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli
ZA	3421,35	3317,00	3256,09	2123,58	2061,12	2010,17	61,5	62,1	61,7
ZB	3421,77	3317,00	3256,09	2123,58	2064,87	2015,68	61,5	62,2	61,9
ZC	3468,83	3383,83	3358,41	2147,73	2084,17	2016,55	61,4	59,5	60,0
ZD	3483,29	3395,75	3370,26	2154,37	2089,17	2087,68	61,3	59,4	61,9
ZE	3803,34	3735,50	3658,89	2426,71	2318,27	2238,37	63,2	58,3	61,2

Tekirdağ Çorlu OSB için 25,00m×42,00m plan boyutlu farklı taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının m² cinsinden kaba yapım maliyetleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 17'de verilmiştir. Çelik taşıyıcı sistemli ve karma taşıyıcı sistemli 25,00m×42,00m plan boyutlu örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin değişiminin kolaylıkla yorumlanabilmesi için Çizelge 17'deki maliyet sonuçları grafik olarak Şekil 7'de verilmiştir.



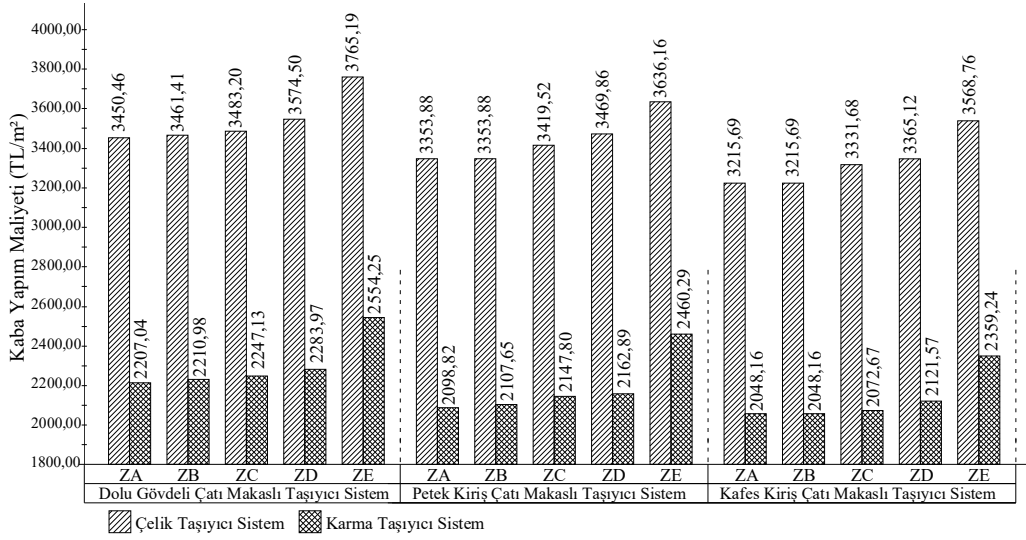
Şekil 6: Tekirdağ Çorlu OSB için 20,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının karşılaştırmalı kaba yapım maliyetleri [12]

Çizelge 17: Tekirdağ Çorlu OSB için 25,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi bina maliyetlerinin karşılaştırılması [12]

Yerel Zemin Sınıfı	Çelik Taşıyıcı Sistem (TL/m²)			Karma Taşıyıcı Sistem (TL/m²)			Karma/Çelik Taşıyıcı Sistem Maliyet Oranları (%)		
	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli
ZA	3450,46	3353,88	3215,69	2207,04	2098,82	2048,16	64,0	62,6	63,7
ZB	3461,41	3353,88	3215,69	2210,98	2107,65	2048,16	63,9	62,8	63,7
ZC	3483,20	3419,52	3331,68	2247,13	2147,80	2072,67	64,5	62,8	62,2
ZD	3574,50	3469,86	3365,12	2283,97	2162,89	2121,57	63,9	62,3	63,0
ZE	3765,19	3636,16	3568,76	2554,25	2460,29	2359,24	67,8	67,7	66,1

Çizelge 16-17 ve Şekil 6-7’de göre Tekirdağ Çorlu OSB için verilen sanayi binası m² kaba yapım maliyetleri incelendiğinde çelik taşıyıcı sistem ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binası örneklerinin tamamında en ekonomik taşıyıcı sistem türünün kafes kiriş çatı makaslı taşıyıcı sistem olduğu, onu sırasıyla petek kiriş çatı makaslı sistem ile dolu gövdeli kiriş çatı makaslı sanayi sisteminin takip ettiği görülmektedir. Tekirdağ Çorlu OSB için karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetleri, çelik taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinden daha düşüktür. 20,00m×42,00m boyutlu örnek bina modellerinde karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin çelik taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerine oranı, dolu gövdeli kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %61,8; petek kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %60,3 ve kafes kiriş çatı makaslı sistemlerde %61,3’tür (Çizelge 16). 25,00m×42,00m boyutlu örnek bina modellerinde karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının

kaba yapım maliyetlerinin çelik taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerine oranı, dolu gövdeli kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %64,8; petek kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %63,6 ve kafes kiriş çatı makaslı sistemlerde %63,7'dir (Çizelge 17). Tekirdağ Çorlu OSB için çelik ve karma taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının tamamında taşıyıcı sistem maliyetlerinin ZA yerel zemin sınıfından ZE yerel zemin sınıfına gidildikçe arttığı görülmektedir.

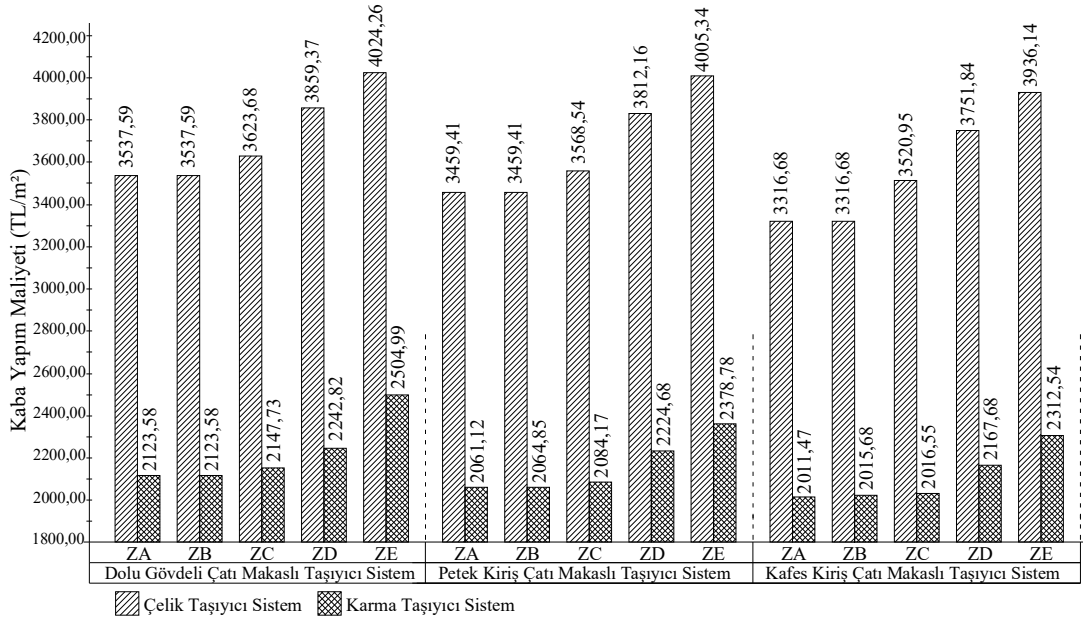


Şekil 7: Tekirdağ Çorlu OSB için 25,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının karşılaştırmalı kaba yapım maliyetleri [12]

İstanbul Beylikdüzü OSB için 20,00m×42,00m plan boyutlu farklı taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının m² cinsinden kaba yapım maliyetleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 18’de verilmiştir. Çelik taşıyıcı sistemli ve karma taşıyıcı sistemli 20,00m×42,00m plan boyutlu örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin değişiminin kolaylıkla yorumlanabilmesi için Çizelge 18’deki maliyet sonuçları grafik olarak Şekil 8’de verilmiştir.

Çizelge 18: İstanbul Beylikdüzü OSB için 20,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi bina maliyetlerinin karşılaştırılması [12]

Yerel Zemin Sınıfı	Çelik Taşıyıcı Sistem (TL/m ²)			Karma Taşıyıcı Sistem (TL/m ²)			Karma/Çelik Taşıyıcı Sistem Maliyet Oranları (%)		
	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli
ZA	3537,59	3459,41	3316,68	2123,58	2061,12	2011,47	60,0	59,6	60,6
ZB	3537,59	3459,41	3316,68	2123,58	2064,85	2015,68	60,0	59,7	60,8
ZC	3623,68	3568,54	3520,95	2147,73	2084,17	2016,55	59,3	58,4	57,3
ZD	3859,37	3812,16	3751,84	2242,82	2224,68	2167,89	58,1	58,4	57,8
ZE	4024,26	4005,34	3936,14	2504,99	2378,78	2312,54	62,2	59,4	58,8

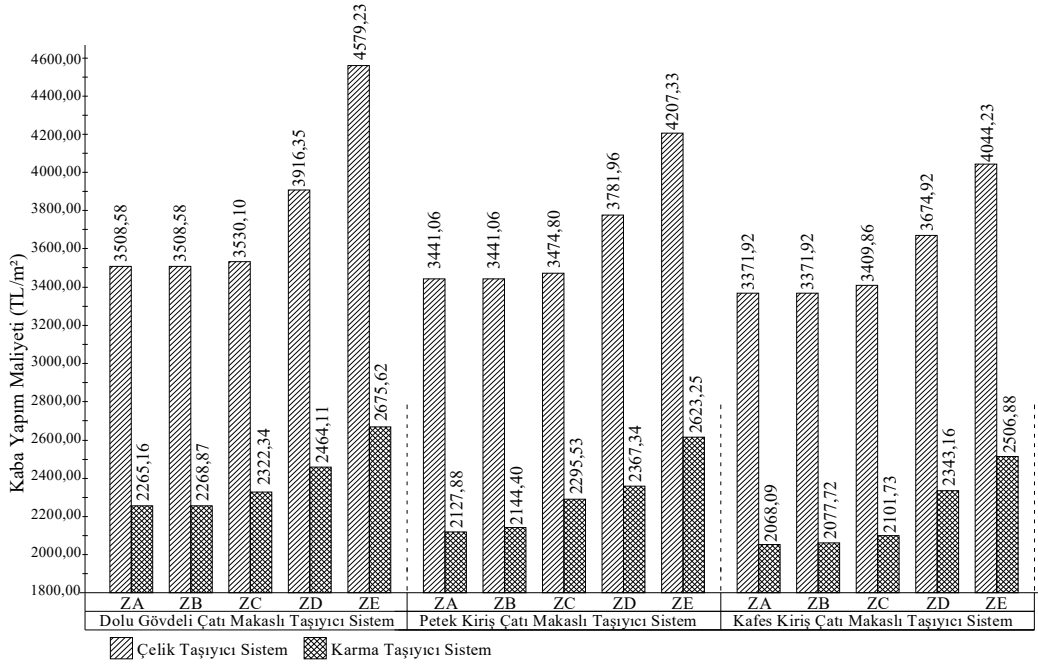


Şekil 8: İstanbul Beylikdüzü OSB için 20,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının karşılaştırmalı kaba yapım maliyetleri [12]

İstanbul Beylikdüzü OSB için 25,00m×42,00m plan boyutlu farklı taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının m² cinsinden kaba yapım maliyetleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 19’da verilmiştir. Çelik taşıyıcı sistemli ve karma taşıyıcı sistemli 25,00m×42,00m plan boyutlu örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin değişiminin kolaylıkla yorumlanabilmesi için Çizelge 19’daki maliyet sonuçları grafik olarak Şekil 9’da verilmiştir.

Çizelge 19: İstanbul Beylikdüzü OSB için 25,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi bina maliyetlerinin karşılaştırılması [12]

Yerel Zemin Sınıfı	Çelik Taşıyıcı Sistem (TL/m ²)			Karma Taşıyıcı Sistem (TL/m ²)			Karma/Çelik Taşıyıcı Sistem Maliyet Oranları (%)		
	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli	Dolu Gövdeli	Petek Kirişli	Kafes Kirişli
ZA	3508,58	3441,06	3371,92	2265,16	2127,88	2068,09	64,6	61,8	61,3
ZB	3508,58	3441,06	3371,92	2268,87	2144,40	2077,22	64,6	62,3	61,6
ZC	3530,10	3474,80	3409,86	2322,34	2295,53	2101,73	65,8	66,0	61,6
ZD	3916,35	3781,96	3674,92	2464,11	2367,34	2343,16	62,9	62,6	63,8
ZE	4579,23	4207,35	4044,23	2675,62	2623,25	2506,88	58,4	62,3	62,0



Şekil 9: İstanbul Beylikdüzü OSB için 25,00m×42,00m boyutlu çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının karşılaştırmalı kaba yapım maliyetleri [12]

Çizelge 18-19 ve Şekil 8-9'a göre İstanbul Beylikdüzü OSB için verilen sanayi bina m² kaba yapım maliyetleri incelendiğinde çelik taşıyıcı sistem ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binası örneklerinin tamamında en ekonomik taşıyıcı sistem türünün kafes kiriş çatı makaslı taşıyıcı sistem olduğu, onu sırasıyla petek kiriş çatı makaslı sistem ile dolu gövdeli kiriş çatı makaslı sistemin takip ettiği görülmektedir. İstanbul Beylikdüzü OSB için karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetleri, çelik taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinden daha düşüktür. 20,00m×42,00m boyutlu örnek bina modellerinde karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin çelik taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerine oranı dolu gövdeli kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %59,9; petek kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %59,1 ve kafes kiriş çatı makaslı sistemlerde %59,1'dir (Çizelge 18). 25,00m×42,00m boyutlu örnek bina modellerinde karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin çelik taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerine oranı dolu gövdeli kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %63,3; petek kiriş çatı makaslı sistemlerde ortalama %63,0 ve kafes kiriş çatı makaslı sistemlerde %62,1'dir (Çizelge 19). İstanbul Beylikdüzü OSB için çelik ve karma taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının tamamında taşıyıcı sistem maliyetlerinin ZA yerel zemin sınıfından ZE yerel zemin sınıfına gidildikçe arttığı görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Türkiye'deki mevcut sanayi binalarını temsil edebilecek çelik ve betonarme-çelik karma taşıyıcı sistemli tek açıklı ve tek katlı örnek sanayi binaları Trakya bölgesinde farklı depremselliğe sahip bölgeler için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019'a göre tasarlanmış ve projeler üzerinden kaba yapım maliyetleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019'daki farklı zemin sınıfları ve Türkiye Deprem Tehlike Haritaları 2019'a göre farklı depremselliğe sahip Kırklareli OSB, Edirne OSB, Tekirdağ Çorlu OSB ve İstanbul Beylikdüzü OSB'ye göre tasarımları yapılan aynı plan boyutlu sanayi binalarının farklı taşıyıcı sistem türleri için hesaplanan kaba yapım maliyetlerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesinden aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

Türkiye Deprem Tehlike Haritaları 2019'a göre incelenen bölgeler içinde depremselliği en az olan Edirne OSB'de tasarım deprem yüküne bağlı olarak görece küçük kesitler taşıma gücü güvenliğini sağladığı için Edirne OSB'de çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetinin en düşük olduğu görülmüştür. Türkiye Deprem Tehlike Haritası 2019'a göre depremsellik düzeyi Edirne OSB'ye benzer olan Kırklareli OSB için yapısal hesap sonuçlarına göre bulunan kesit boyutlarının Edirne OSB'ye oldukça yakın olduğu, Kırklareli OSB için çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinin Edirne OSB için bulunan maliyetlere çok yakın değerler aldığı görülmüştür. Türkiye Deprem Tehlike Haritası 2019'a göre Edirne OSB ve Kırklareli OSB'ye göre depremselliği daha fazla olan Tekirdağ Çorlu OSB ve İstanbul Beylikdüzü OSB'de deprem yüklerindeki artış ile sanayi binası taşıyıcı sistem kesit boyutları ve kaba yapım maliyetleri artmaktadır. Kaba yapım maliyet sonuçlarına göre çelik ve karma taşıyıcı sistemli örnek sanayi binaları için hesaplanan kaba yapım maliyetlerinin Edirne OSB'de en düşük, İstanbul Beylikdüzü OSB'de en yüksek olduğu; kaba yapım maliyetlerinin en düşükten en yükseğe doğru Edirne OSB, Kırklareli OSB, Tekirdağ Çorlu OSB ve İstanbul Beylikdüzü OSB şeklinde sıralandığı görülmüştür.

Çalışmada incelen bölgelerin tamamında tüm zemin sınıfları için karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetleri, çelik taşıyıcı sistemli sanayi binalarının kaba yapım maliyetlerinden düşüktür. Çelik ve karma taşıyıcı sistemler arasındaki bu maliyet farkının, yatay yükler için çelik taşıyıcı sistemli sanayi binalarında düşey taşıyıcı elemanlar arasında yatay stabilite elemanlarına ihtiyaç duyulurken; karma taşıyıcı sistemli sanayi binalarında düşey taşıyıcılar arasında stabilite elemanlarına ihtiyaç olmamasından ve Türkiye'de yerinde dökme betonarme imalatın çelik imalatından daha ucuz olmasından kaynaklandığı rahatlıkla söylenebilir.

Çalışmada incelen tüm bölgelerde çelik ve karma taşıyıcı sistemli örnek sanayi binalarının tamamında, taşıyıcı sistem maliyetlerinin ZA yerel zemin sınıfından ZE yerel zemin sınıfına gidildikçe arttığı görülmektedir.

İncelenen bölgelerin tamamında tüm zemin sınıfları için çelik taşıyıcı sistemli sanayi bina örneklerinin tamamında en ekonomik sistemin kafes kiriş çatı makaslı taşıyıcı sistem olduğu, onu sırasıyla petek kiriş çatı makaslı sistem ile dolu gövdeli kiriş çatı makaslı sistemin takip ettiği görülmüştür. Çelik taşıyıcı sistemlere benzer şekilde karma taşıyıcı sistemler için de en ekonomik taşıyıcı sistemin kafes kiriş çatı makaslı taşıyıcı sistem olduğu, onu sırasıyla petek kiriş çatı makaslı sistem ile dolu gövdeli kiriş çatı makaslı sistemin takip ettiği görülmüştür.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, incelenen çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi binası örnekleri için geçerlidir. Uygulamada sanayi binaları için ekonomik taşıyıcı sistem seçimi, bu çalışmada elde edilen sonuçlar dikkate alınarak proje özelinde yapılacak maliyet hesapları ile belirlenmelidir.

Not: Bu çalışma Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019'a Göre Tasarlanmış Sanayi Yapılarının Kaba Yapım Maliyetlerinin Karşılaştırılması" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

H.N.: Yöntem, yazılım, doğrulama, araştırma, kaynaklar, yazı yazma.

B.Ö.: Yöntem, yazılım, doğrulama, araştırma, kaynaklar, yazı yazma - gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

[1] Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Raporları (2023). Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, Ankara, Erişim adresi: <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/03/2023-Kahramanmaraş-ve-Hatay-Depremleri-Raporu.pdf>. Erişim tarihi: 20.10.2023.

[2] AFAD (2022). T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı İnternet Sitesi, Erişim adresi: <https://www.afad.gov.tr/> Erişim tarihi: 20.10.2023.

[3] Odabaşı, Ö., Kohrengi, M., Bazurro, P. (2021). Tall buildings in Turkey, their characteristic structural features and dynamic behavior, *Bull. Earthq. Eng.*, 19, 2105–2124. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01067-3>

[4] Özşahin, B. (2022). An assessment of the relation between architectural and structural systems in the design of tall buildings in Turkey, *Buildings*, 12 (10):1649. <https://doi.org/10.3390/buildings12101649>

[5] Şamandar, A. ve Polat A. H. (2015). Çelik ve betonarme prefabrik fabrika yapılarında inşaat maliyetlerinin karşılaştırılması, *3rd International Symposium On Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2015)*, Universidad Politecnica de Valencia, 3-5 June 2015, 2451-2457.

[6] Yonar, O. C. (2002). Büyük açıklıklı sanayi yapılarının yapısal oluşumu ve Türkiye’de örnekler üzerinde irdelenmesi, (Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü*). Erişim adresi: <http://www.dspace.yildiz.edu.tr/xmlui/handle/1/11072>

- [7] Özşahin, B. (2021). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019'a göre Kırklareli için deprem yüklerinin değerlendirilmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(2), 836-863. <https://doi.org/10.29130/dubited.768494>
- [8] Seyrek, E. (2020). Yeni Türkiye sismik tehlike haritasının Ege Bölgesi için değerlendirilmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1):414-423. <https://doi:10.28948/ngumuh.617268>.
- [9] Hızıroğlu, E. (1979). Endüstri yapıları tasarımında kullanılabilir bir yöntem modeli insan ögesi ve üretim oluşumu değerlendirmesi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları*, İstanbul.
- [10] Eren, Ö. (2014). *Büyük açıklıklı çelik yapılar*, 1. Baskı, İstanbul: Arı Sanat Yayınevi.
- [11] Duranoğlu, R. (2019). Tek katlı endüstriyel yapıların düzlem ve uzay kafes sistem çözümlerinin karşılaştırılması, (Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü*). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- [12] Nuryadı, H. (2023). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019'a göre tasarlanmış sanayi yapılarının kaba yapım maliyetlerinin karşılaştırılması, (Yüksek Lisans Tezi, *Kırklareli Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü*). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- [13] İdeCad Statik v10. İdecad Statik Paket Programı, *ideYAPI*, İstanbul, Erişim adresi: <https://www.idecad.com.tr/index/>
- [14] SAP 2000 V.22, Integrated Software for Structural Analysis and Design, *Computers and Structures Inc.*, California, USA.
- [15] TDTH 2019, Türkiye Deprem Tehlike Haritaları interaktif web uygulaması, Erişim adresi: <https://tdth.afad.gov.tr/> Erişim tarihi:14.10.2020
- [16] TBDY 2019 (2019). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, T.C Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara. Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdf>
- [17] TS 500 (2000). *Betonarme Yapıların Tasarımı ve Yapım Kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. Erişim adresi: <https://www.tse.org.tr/>
- [18] ÇYTHYEY 2018 (2018). *Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik*, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara. Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/02/20180215M1-4.htm>
- [19] TS 498 (1997). *Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. Erişim adresi: <https://www.tse.org.tr/>
- [20] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2022). *İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları 2022/3*, Erişim adresi: <https://yfk.csb.gov.tr/birim-fiyatlar-i-100468>
- [21] TS 648 (1982). *Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. Erişim adresi: <https://www.tse.org.tr/>

Toksijenik *Aspergillus flavus*'un Büyümesini Kontrol Etmek için *Thymus longicaulis*'in Değerlendirilmesi

Bilal Balkan^{1*}, Seda Balkan¹

¹Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye

Geliş: 14.06.2023, Kabul: 24.12.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

ÖZ

Bu çalışmada Lamiaceae familyasına ait *Thymus longicaulis*'in sulu ekstraktlarının *Aspergillus flavus*'un büyümesi üzerine olan etkisinin *in vitro* ve *in vivo* olarak değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Kurutulmuş *T. longicaulis*'in tozları *A. flavus*'un misel büyümesini %70.53 oranında inhibe etmiştir. *T. longicaulis* sulu ekstraktlarının *A. flavus*'a karşı minimum inhibitör konsantrasyon (MİK) değeri 1000 µg/mL idi. *T. longicaulis* sulu ekstraktları sıvı besiyerindeki 5 günlük saklanma sürelerinden sonra petri kaplarına aktarıldığında ayçiçeği, buğday, mısır ve pirinçte yapay olarak oluşturulan *A. flavus* çürümesini tamamen engelleyememiştir. Test edilen tüm konsantrasyonlarda 5 günlük inkübasyon süresi boyunca *T. longicaulis* sulu ekstraktlarının sadece ayçiçeğinde etkin olduğu belirlenmiştir (p<0.05). *T. longicaulis* sulu ekstraktlarının hifal morfoloji üzerine lizis, çökertme, yassılaşıma ve kırışık hücre yüzeyli hücreler dejeneratif değişimlerini yaptığı SEM analizi ile tespit edilmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre *T. longicaulis* sulu ekstraktlarının aflatoxin B1 üreticisi olan toksijenik *A. flavus*'un ayçiçeğinde oluşturduğu enfeksiyonları önleyebilmek için koruyucu olarak rol oynayabileceğini ifade edebiliriz.

Anahtar Kelimeler: *Aspergillus flavus*; *Thymus longicaulis*; Antifungal; Bitki ekstraktı; SEM

Assesment of *Thymus longicaulis* to Control The Growth of Toxigenic *Aspergillus flavus*

ABSTRACT

In this study, the effect of aqueous extracts of *Thymus longicaulis*, belonging to the Lamiaceae family, on the growth of *Aspergillus flavus* was evaluated *in vitro* and *in vivo*. Dried powders of *T. longicaulis* inhibited mycelial growth of *A. flavus* by 70.53%. The minimum inhibitory concentration (MIC) value of *T. longicaulis* aqueous extracts against *A. flavus* was 1000 µg/mL. When *T. longicaulis* aqueous extracts were transferred to petri dishes after 5 days of storage in liquid medium, they could not completely prevent the artificially induced *A. flavus* decay in sunflower, wheat, corn and rice. *T. longicaulis* aqueous extracts were found to be effective only in sunflower at all tested concentrations during the 5-day incubation period (p<0.05). It was determined by SEM analysis that aqueous extracts of *T. longicaulis* made lysis, collapse, flattening and degenerative changes of cells with wrinkled cell surfaces on hyphal morphology. According to the results of the study, we can state that aqueous extracts of *T. longicaulis* can play a protective role in order to prevent infections caused by toxigenic *A. flavus*, a producer of aflatoxin B1, in sunflower.

Keywords: *Aspergillus flavus*; *Thymus longicaulis*; Antifungal; Plant extract; SEM

1. GİRİŞ

Gıdaların mikotoksinler ile kontaminasyonu, tahıllar ve diğer tarım ürünleri için önemli bir gıda güvenliği sorunudur. Mikotoksinlerle, özellikle de aflatoksinler ile kontamine gıdalar bazen ölümcül akut hastalıklara neden olabilmektedir. Her yıl dünyadaki tahıl mahsullerinin önemli bir yüzdesi aflatoksinler gibi tehlikeli mikotoksinler ile kontamine olmaktadır [1].

Filamentli küflerden Aspergillus cinsi, gıda kontaminasyonundan sorumlu başlıca küftür. Bu küfler uygun sıcaklık ve nem koşullarında, uygun olmayan şekilde depolanan mısır, pirinç, yer fıstığı, acı biber, sirke, pamuk tohumu, mısır, ağaç yemişleri, buğday ve baharat gibi gıda maddeleri üzerinde büyüyebilirler [2]. Bunun sonucunda gıdalarda bozulmalara, besin değerlerinde azalmaya, duyu kalitenin değişmesine neden olurlar. Bazı Aspergillus türleri ise mikotoksin ürettiğinden dolayı halk sağlığı sorunu haline gelmişlerdir [3]. *Aspergillus flavus* Link ex. Fries, tahılları ve diğer gıdaları kontamine eden, kanserojen ve oldukça toksik bir mikotoksin olan aflatoksin B1 üreten aerobik bir küf türüdür [4].

Büyük çaplı üretimlerde gıdanın korunması için sentetik katkı maddelerinin yaygın olarak kullanımı zorunlu olmuştur. Fakat bazı sentetik katkı maddelerinin günlük alımı, araştırmacılar ve devlet kurumları için bir endişe kaynağı olmuştur [5]. Tüketicilerde sentetik koruyucuların aşırı kullanımından endişe duymakta ve yeni doğal koruma yöntemlerini arzulamaktadır. Duyulan bu endişe 'yeşil' politikalar oluşturmak için gıda sektörünü harekete geçirmiştir.

Kimyasal koruyucu madde içermeyen gıdalara artan talep ile birlikte bu koruyucular ile ilgili sıkı denetim mevzuatı, gıda endüstrisinde “doğal olarak elde edilen” antimikrobiyallere yönelik araştırmaların artmasını teşvik etmiştir [5].

Bilimsel çalışmalar, potansiyel olarak bitkilerde, baharatlarda ve türevlerinde bulunan biyoaktif bileşiklerin, antimikrobiyal, antioksidan ve antikanser aktivitelerini göstermiştir [6, 7]. Kimyasal bileşikler yerine bitki bazlı aktif içeriklerin kullanımı genellikle daha güvenli, çevre dostu ve mantarların büyümesini kontrol etmede etkili olduğu ve farklı mekanizmalarla toksik bileşikleri ortadan kaldırdığı için genellikle tercih edilmektedir [8].

Antimikrobiyal ve antifungal etkinliği bilinen *Thymus longicaulis*'in [9] literatürde *A. flavus*' un büyümesi üzerine olan etkisinin ayrıntılı bir şekilde *in vitro* ve *in vivo* incelenmesine rastlanılmamıştır. Bu projede Lamiaceae familyasına ait *T. longicaulis* sulu ekstraktlarının gıdalarda bozulmalara neden olan ve aflatoksin üretme yeteneğindeki *A. flavus*'un üzerine antifungal etkinliğinin *in vitro* ve *in vivo* değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Mikroorganizma

Aspergillus flavus Trakya Üniversitesi Arda Meslek Yüksekokulu küf koleksiyonundan temin edildi. Saf kültür, canlılığı devam ettirilmek üzere yatık agarlı Patates Dekstroz Agar (PDA) besiyerlerinde +4°C'de muhafaza edilerek ayda bir pasajlandı.

2.2. *Thymus longicaulis* Ekstraktının Hazırlanması

Kırklareli, Merkez, Armağan köyü baraj civarından toplanan *Thymus longicaulis* Dr. Hüseyin ERSOY tarafından teşhis edildi. Direk güneş ışığı almayacak bir alanda gölgede kurutulan *T. longicaulis*, öğütülerek toz haline getirildi ve kullanıma kadar +4°C'de muhafaza edildi. 10 gr bitki tozu kaynayan 100mL distile suda 10 dk. süre çalkalanarak demleme yolu ile ekstrakte edildi. Daha sonra filtre edilerek liyofilizasyon işlemi gerçekleştirildi. Ekstraktların uygun ağırlığının distile suda çözülmesi bitki ekstraktlarının çeşitli sulu konsantrasyonları hazırlandı [10].

2.3. *Aspergillus flavus* 'un Misel Büyümesi Üzerine *Thymus longicaulis* 'in *in vitro* Etkisi

40°C'de eritilmiş 100 mL PDA'ya 10 gr bitki tozu eklendi. Oluşan süspansiyon 10 dk. karıştırılarak 121°C'de 15 dk. otoklavlandı. Daha sonra steril gazlı bezden süzülerek petri plaklarına döküldü [11]. Petri plakları PDA besiyerinde aktif olarak büyüyen bir haftalık kültürün aktif büyüme ucundan steril mantar delici ile alınan 7 mm çapındaki küf diskleri ile aşılandı. 25°C'de 5 gün inkübe edildi. Misel büyüme inhibisyonu (MBİ) = [(KBMÇ-BTBMÇ)/KMBÇ] x 100 formülünden hesaplandı (KBMÇ; kontrol besiyeri misel çapımı, BTBMÇ; bitki tozlu besiyerinin misel çapımı ifade etmektedir [12].

2.4. *Thymus longicaulis* 'in Minimum İnhibitör Konsantrasyonunun (MİK) Belirlenmesi

A. flavus küfüne (10⁴ CFU/mL) karşı *T. longicaulis* ekstraktının antifungal aktivitesi Klinik ve Laboratuvar Standartları Enstitüsü (CLSI) prosedürüne göre test edildi [13]. MİK değerleri morfolinopropansülfonik (MOPS) ile pH 7.0'ye tamponlanmış RPMI-1640 besiyerinde 96 kuyucuklu plaklarda gerçekleştirildi. Plaklar 5 gün süresince 25°C'de inkübe edildi. MİK değeri görsel olarak, inkübasyondan sonra fungal büyümenin olmadığı en düşük konsantrasyon şeklinde belirlendi.

2.5. Çeşitli Tahıllarda Yapay Olarak Oluşturulan *Aspergillus flavus* Çürümesine Karşı Sulu *Thymus longicaulis* Ekstraktının Etkisi

Çeşitli tahıl taneleri (ayçiçeği, buğday, mısır ve pirinç) 40°C de 48 saat kurutuldu ve Erlenmayerlere konularak 121°C de 15 dk. otoklavlandı. Otoklavlanmış tahıllar 10⁴ CFU/mL spor içeren tüplere transfer edilerek 1 dk.

bekletildi. Daha sonra 2, 4, 8, 16 ve 32 mg/mL konsantrasyonlar da sulu bitki ekstraktı içeren test tüplerine alındı. Kontroller test edilen tahıl taneleri, *A. flavus* sporları ve besiyerinden oluşmakta idi. Tüpler 25°C de 5 gün inkübe edildi. Sonrasında ise tahıl taneleri PDA içeren petri plaklarına aktarıldı [14]. Radyal misel büyümesi 5 gün boyunca kaydedildi.

2.6. Aspergillus flavus Hifal Morfoloji Üzerine Sulu Thymus longicaulis Ekstraktun Etkisinin Taramalı Elektron Mikroskobu İle Belirlenmesi

7 günlük kültürden hazırlanan spor süspansiyonundan (10^4 spor/mL) PDA içeren petri plaklarının merkezine 10µL damlatıldı ve 2 gün 25°C'de inkübe edilerek misel büyümesi sağlandı. Daha sonra *T. longicaulis* sulu ekstraktı petri plaklarının üzerine tamamen kapatacak şekilde damlatıldı (4MİK). 3 gün 25°C'de inkübe edilen *A. flavus* kültürlerinden mantar delici ile yarıçapı 1 cm'lik misel diskler çıkarıldı. SEM analizi için bu misel diskler oda sıcaklığında 2 saat 0.1 M fosfat tamponu (pH 7.2) içinde hazırlanmış %2.5'lik glüteraldehit ile fiske edildi. Fiksasyondan sonra örnekler 30 dk. etanol serilerinden (%70, 80, 90 ve 100) geçirilerek dehidrasyona uğrattıldı [12]. Örneklerin 5Kv voltajda SEM Quanta 400 kullanılarak dijital görüntüleri elde edildi.

2.7. İstatistiksel analiz

Verilerin istatistiksel değerlendirmeleri için tanımlayıcı istatistik analizi yapıldı. Grup ortalamaları arasındaki farkın önemlilik derecesi varyans analizi (ANOVA) ve Mann-Whitney U Testi ile belirlendi. Bu işlemler için "SPSS for Windows, v 15.0" istatistik paket programı kullanıldı ve $p < 0.05$ ten küçük değerler anlamlı olarak kabul edildi.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

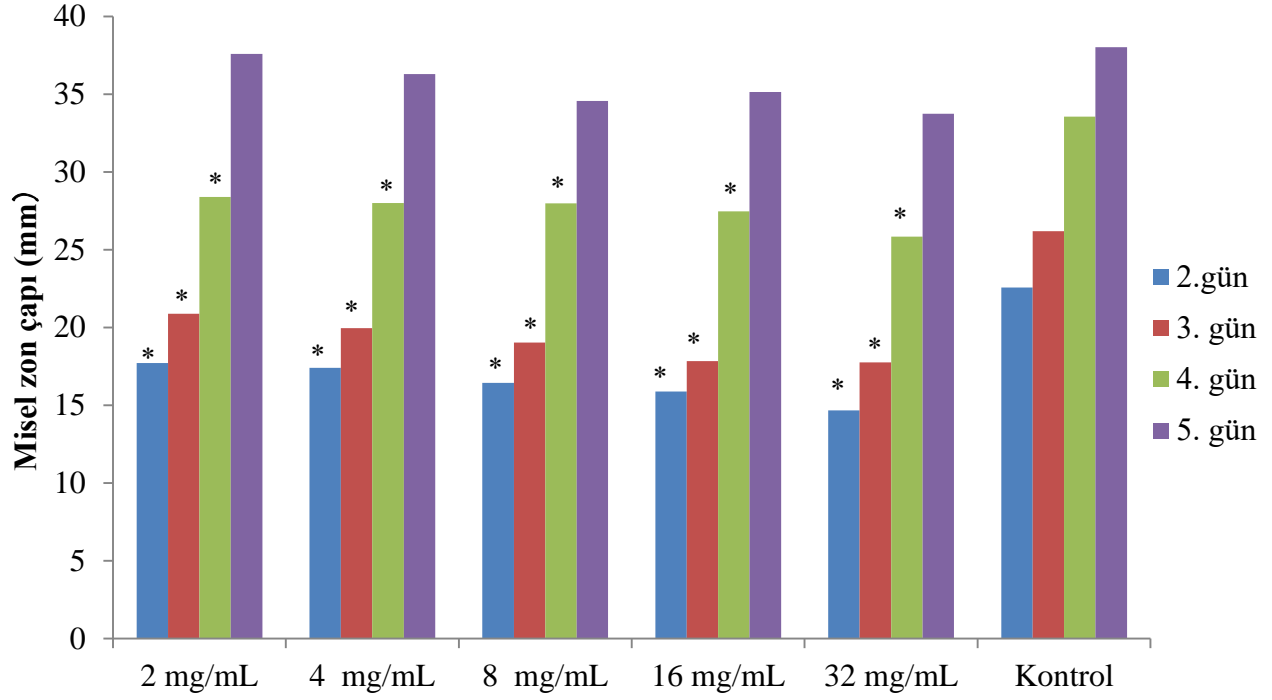
Thymus longicaulis tozları *A. flavus*'un misel büyümesi üzerine %70.53 oranında inhibitör etki göstermiştir. Fungal büyüme üzerine bitki ekstraktlarının etkisinin onların sekonder metabolitlerinden (fenolik, alkaloidler, flavonoidler ve terpenoidler gibi) dolayı olabileceği rapor edilmiştir [15]. Patojenik ajanların gelişimini engellemede fenolik bileşiklerin pek çok etki tarzı olduğu önerilmiştir. Bu etkiler nedeni ile patojenik ajanın enerji üretimindeki enzimatik prosesleri bozulur, hücre membranının geçirgenlik bariyeri hasar görür ya da zayıflar, hücresinin fizikokimyasal yapısı değişir veya nükleik asit sentezi etkilenir [16]. Elde ettiğimiz sonuç ve aynı zamanda benzer çalışmalardaki sonuçlar dikkate alındığında [11, 10, 17] *T. longicaulis*'in potansiyel antifungal aktiviteye sahip olduğunu söyleyebiliriz.

MİK küf gelişimini inhibe eden bitki ekstraktının en düşük konsantrasyonudur. Çalışmamızda *T. longicaulis* ekstraktının MİK değeri 1000 µg/mL olarak bulunmuştur. Almeida vd. tarafından [5] *A. flavus*'a karşı *Origanum vulgare* ve *Mentha arvensis* yağının MİK değeri sırası ile 4 ve 8 mg/mL olarak rapor edilmiştir.

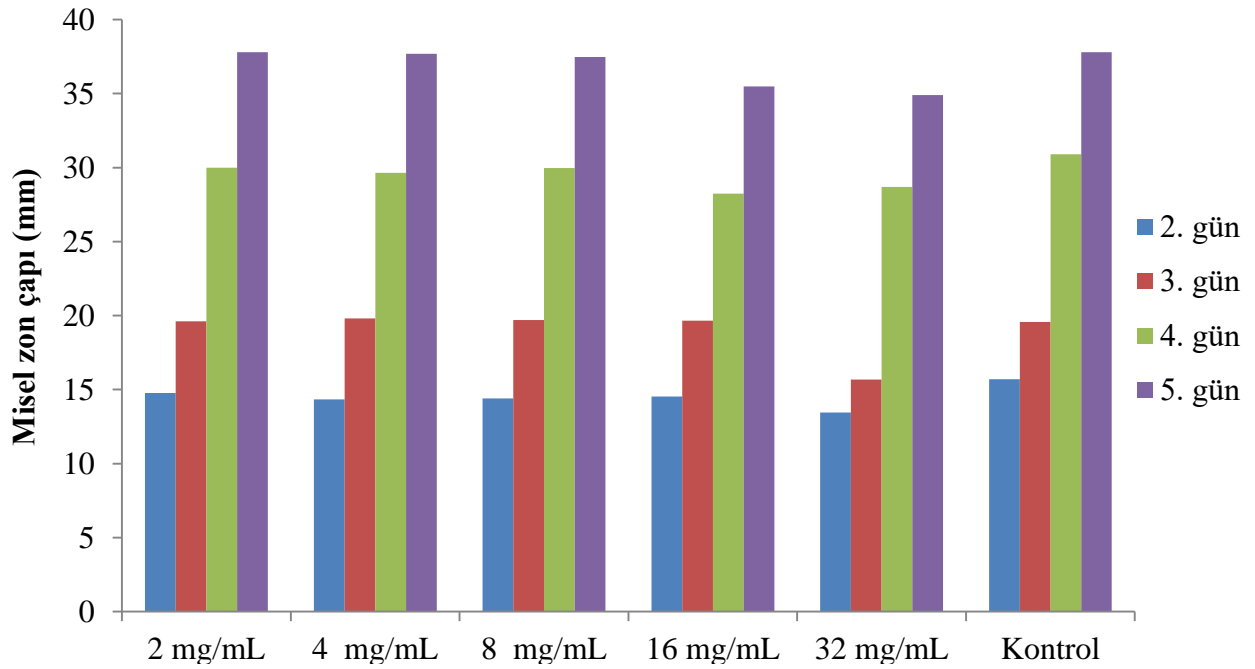
Solanum aculeastrum için *A. flavus*'a karşı MİK değeri 25 mg/mL olarak bildirilmiştir [18]. *Cymbopogon citratus*, *Moringa oleifera*, *Ocimum gratissimum* ve *Clerodendrum volubile* bitkilerinin etanol, soğuk ve sıcak su ekstraktlarının *A. flavus*'a karşı etkinliğinin araştırıldığı başka bir çalışmada en düşük MİK değerlerinin *Cymbopogon citratus* sıcak su ekstraktları (6.25 mg/mL), *Moringa oleifera* etanol ve sıcak su ekstraktları (12.5 mg/mL), *Ocimum gratissimum* etanol ve sıcak su ekstraktları (25 mg/mL) ve *Clerodendrum volubile* soğuk su ekstraktı (25 mg/mL) ile belirlendiği rapor edilmiştir [19]. Farklı bitkiler ile *A. flavus*'a karşı yapılan testlerin sonuçlarına göre *A. flavus*'un antifungal ajanlara duyarlılık derecesinde büyük farklılıklar gösterdiği görülmektedir.

T. longicaulis sulu ekstraktlarının sıvı besiyerindeki 5 günlük saklanma sürelerinden sonra petri kaplarına aktarıldığında *A. flavus*'un misel büyümesini tamamen engelleyemediği belirlendi. Petri kaplarında 5 günlük inkübasyon süresinin sonunda kontrol örnekleri ile karşılaştırıldığında *A. flavus*'un misel büyümesinde gerileme olduğu tespit edildi. Özellikle ayçiçeğinde test edilen tüm konsantrasyonlarda *T. longicaulis* sulu ekstraktı 5 günlük inkübasyon süresi boyunca etkindi (Şekil 1; $p < 0.05$). *T. longicaulis*'in test edilen ekstrakt konsantrasyonlarının pirinçte *A. flavus* misel büyümesi üzerine anlamlı bir etkinlik gösteremediği belirlendi (Şekil 2; $p < 0.05$). Buğdayda *A. flavus*'un misel büyümesi üzerine *T. longicaulis* sulu ekstraktlarının 16 ve 32 mg/mL konsantrasyonlarda 4 günlük inkübasyon sonunda anlamlı bir etki gösterdiği gözlemlendi (Şekil 3; $p < 0.05$). Mısırdaki *A. flavus*'un misel büyümesi üzerine *T. longicaulis* sulu ekstraktlarının 32 mg/mL konsantrasyonları inkübasyon süresi boyunca anlamlı bir etkinlik gösterdiği tespit edildi (Şekil 4; $p < 0.05$). Tahılların mineralleri, vitaminleri, pH'sı veya doğal fenolik bileşikleri gibi özellikleri değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle *T. longicaulis* sulu ekstraktları test edilen tahıllarda farklı koruyucu etkinlik göstermiş olabilir.

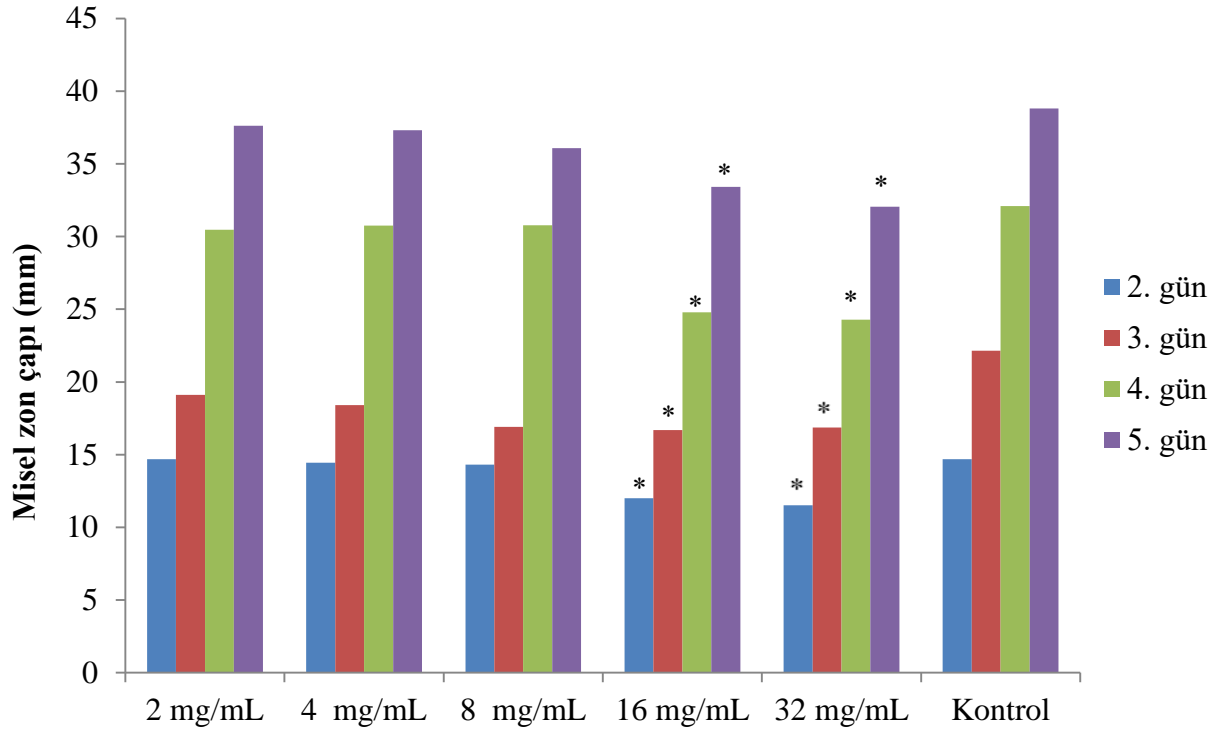
Lima vd. [14] tarafından yapılan çalışmada benzer sonuçlar rapor edilmiştir. Mısır tanesi kontaminasyon modelinde, karvakrol ve timol içeren sıvı besiyerlerinde 7 günlük saklama periyodunun sonunda *A. flavus* büyümesinin görülmediği ancak mısır taneleri petri kaplarına aktarıldığında misel büyümesinin inkübasyonun 2. gününden itibaren görüldüğü belirtilmiştir. Koruyucu etkinin sadece tahıllar ile temas sırasında olduğu ifade edilmiştir.



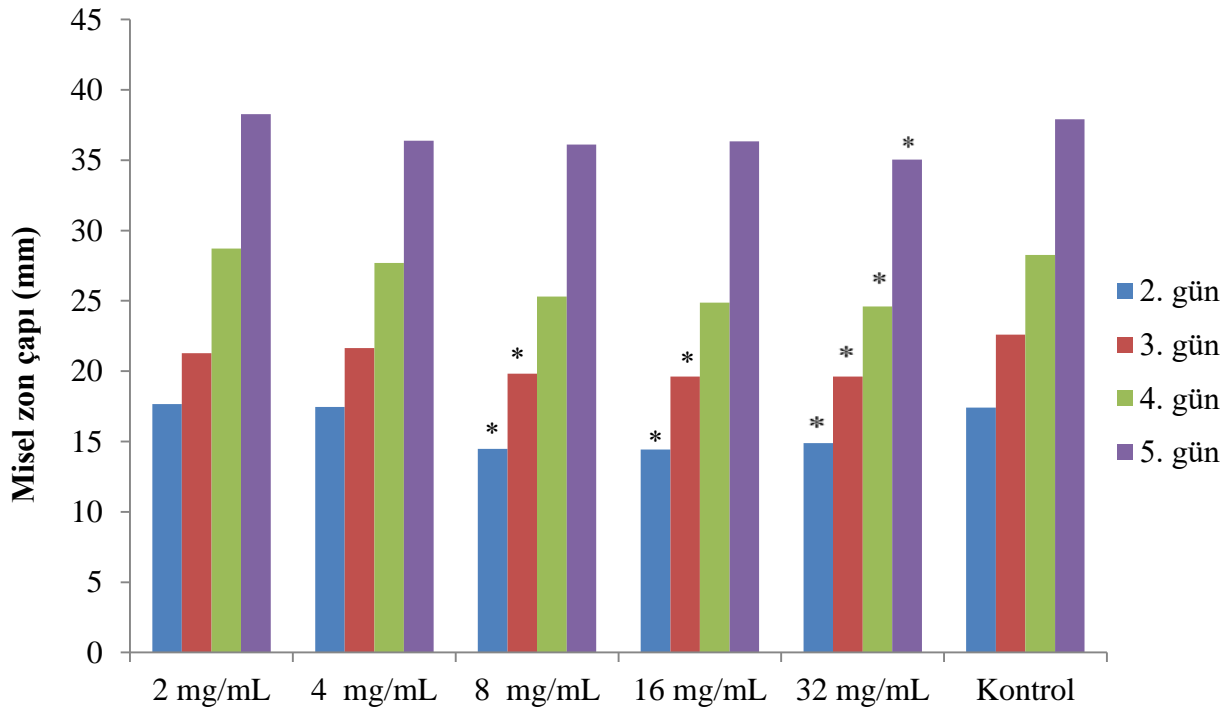
Şekil 1: Ayçiçeğinde *A. flavus*' un büyümesi üzerine *T. longicaulis* sulu ekstraktlarının etkisi.* $p < 0.05$.



Şekil 2: Pirinçte *A. flavus*' un büyümesi üzerine *T. longicaulis* sulu ekstraktlarının etkisi.* $p < 0.05$.



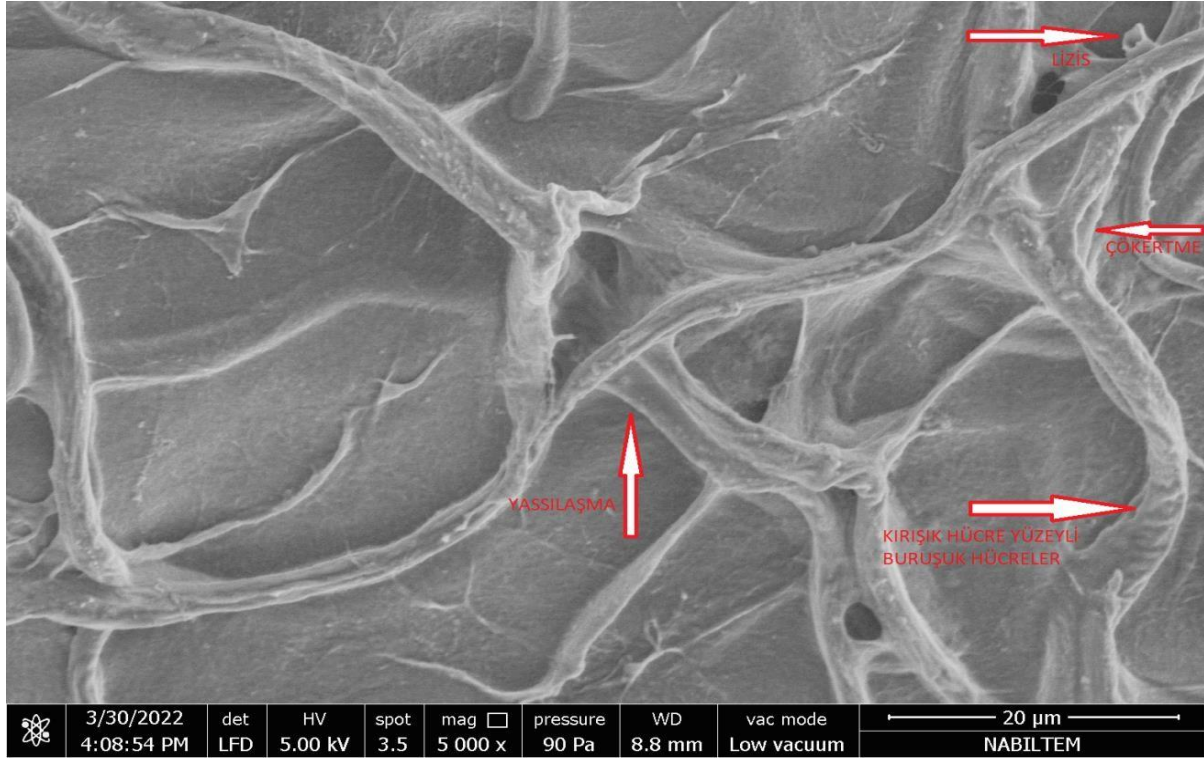
Şekil 3: Buğdayda *A. flavus*'un büyümesi üzerine *T. longicaulis* sulu ekstraktlarının etkisi. *p<0.05.



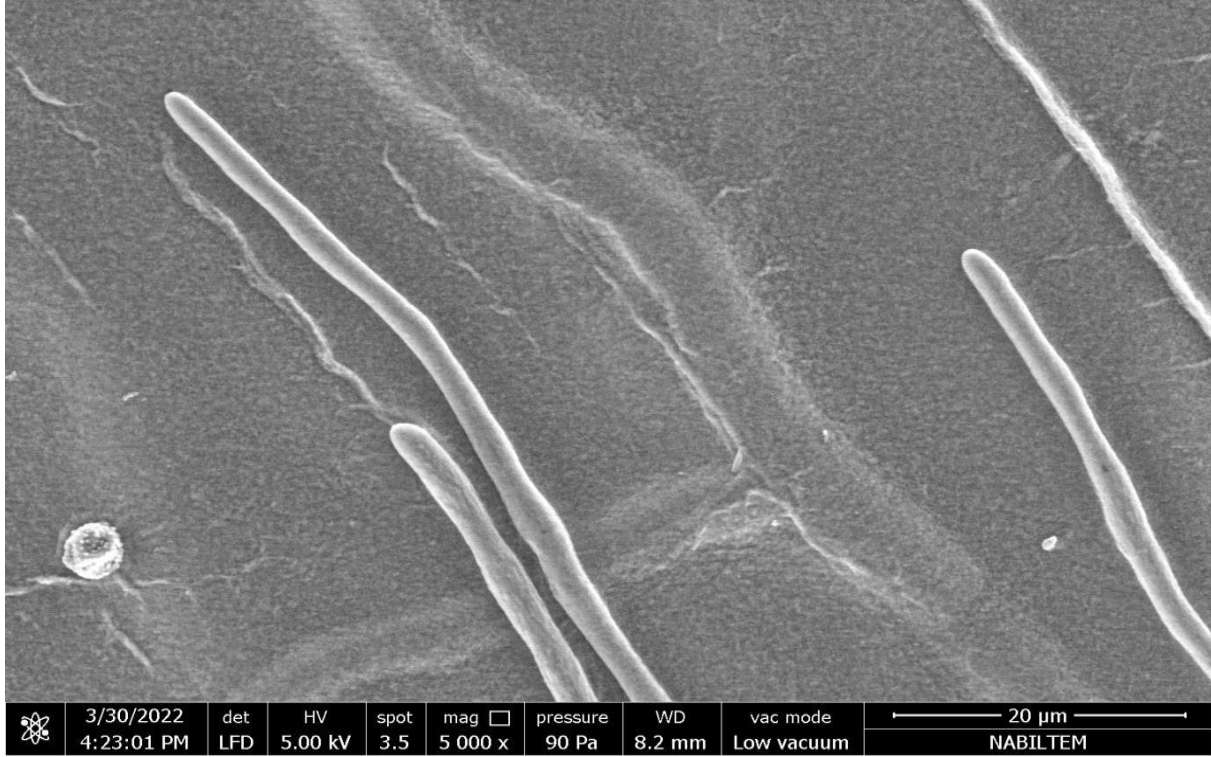
Şekil 4: Mısırdaki *A. flavus*'un büyümesi üzerine *T. longicaulis* sulu ekstraktlarının etkisi. *p<0.05.

Dejeneratif değişimlere sahip ve sağlıklı hiflerin SEM görüntüleri Şekil 5 ve 6'da gösterilmiştir. *T.*

longicaulis'in 4MİK sulu ekstraktına maruz kalmış ve maruz kalmamış *A. flavus*'un hifal morfolojileri karşılaştırıldığında önemli morfolojik değişimler belirlendi. Sağlıklı *A. flavus*'un hifal yapısı doğrusal, düzenli ve homojen olarak gözlemlendi. *T. longicaulis* sulu ekstraktlarının hif morfoloji üzerine yaptığı belirlenen dejeneratif değişimleri; lizis, çökertme, yassılaştırma ve kırışık hücre yüzeyli hücreler olarak sıralayabiliriz. Bu bulgular uygulanan sulu bitki ekstraktının *A. flavus*'un büyümesini inhibe eden fitotoksik özelliklere sahip antifungal bileşikler içerdiğini doğrulamaktadır.



Şekil 5: 4MİK *T. longicaulis* sulu ekstraktına maruz kalmış *A. flavus* hiflerinin SEM görüntüsü.



Şekil 6: Bitki ekstraktına maruz kalmamış *A. flavus* sağlıklı hifinin SEM görüntüsü.

4. SONUÇ

T. longicaulis, *A. flavus* ' un misel büyümesini %70.53 oranında inhibe etmiştir. *T. longicaulis* sulu ekstraktlarının ayçiçeği, buğday, mısır ve pirinçte yapay olarak oluşturulan *A. flavus* çürümesini tamamen engelleyemediği sadece ayçiçeğinde etkin olduğu belirlenmiştir ($p < 0.05$). Hifal morfoloji üzerine dejeneratif değişimler yapmıştır. Elde edilen sonuçlara göre *T. longicaulis* sulu ekstraktlarının aflatoksin B1 üreticisi olan toksijenik *A. flavus* 'un ayçiçeğinde oluşturduğu enfeksiyonların önlenmesi için doğal koruyucu olarak değerlendirilebileceğini ifade edebiliriz.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kırklareli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir, Proje No: KLÜBAP/228

YAZARLARIN KATKILARI

B.B.: Yöntem, analiz, araştırma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

S.B.: Analiz, araştırma, kaynaklar, yazı yazma - gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

- [1] Yazdani D., Ahmad Z.A.M., How T.Y., Jaganath I.B., Shahnazi S., Inhibition of aflatoxin biosynthesis in *Aspergillus flavus* by phenolic compounds extracted of Piper betle L., Iranian Journal of Microbiology, C 5 (4), S 428-433, 2013.
- [2] Hourieh A., Ocimum Basilicum : A Candidate Plant Against Aflatoxins Production with Antioxidant Activity, Journal of Materials and Environmental Science, C 5, S707-714, 2021.
- [3] Zulkifli, N. A. and Zakaria L., Morphological and molecular diversity of *Aspergillus* from corn grain used as livestock feed, HAYATI J. Biosci. C 24, S 26-34, 2017.
- [4] Espinel-Ingroff, A., Barchiesi, F., Cuenca-Estrella, M., Pfaller, M. A., Rinaldi, M., Rodriguez-Tudela, J. L., & Verweij, P. E., International and multicenter comparison of EUCAST and CLSI M27-A2 broth microdilution methods for testing susceptibilities of *Candida* spp. to fluconazole, itraconazole, posaconazole and voriconazole, Journal of Clinical Microbiology, C 43(8), S 3884-3889, 2005.
- [5] Almeida P., Blanco-Pascual N., Rosolen D., Cısılotto J., Creczynski-Pasa T., Laurindo J., Antioxidant and antifungal properties of essential oils of oregano (*Origanum vulgare*) and mint (*Mentha arvensis*) against *Aspergillus flavus* and *Penicillium commune* for use in food preservation, Food Science and Technology, DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.64921>, 2022.
- [6] Kaefer, C. M., & Milner, J. A., The role of herbs and spices in cancer prevention, The Journal of Nutritional Biochemistry, C 19(6), S 347-361, 2008.
- [7] Yuan, G., Chen, X., & Li, D., Chitosan films and coatings containing essential oils: the antioxidant and antimicrobial activity, and application in food systems, Food Research International, C 89, S 117-128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2016.10.004>. PMID:28460897, 2016.
- [8] Nassim S., Ardakani M.M., Hemmati R., Parroni A., Beccaccioli M. and Reverberi M., The Potential of Plant-Based Bioactive Compounds on Inhibition of Aflatoxin B1 Biosynthesis and Down-regulation of aflR, aflM and aflP Genes, Antibiotics, C 9, S 728; doi:10.3390/antibiotics9110728, 2020.
- [9] Elkiran O., Chemical Composition of the Essential Oil of *Thymus longicaulis* C. Presl. subsp. longicaulis, International Journal of Secondary Metabolite, Vol. 9, No. 3, 248–257, 2022.
- [10] Talibi, I., Askarne L., Boubaker H., Boudyach E.H., Msanda F., Saadi B., Ait Ben Aoumar A., Antifungal activity of some Moroccan plants against *Geotrichum candidum*, the causal agent of postharvest citrus sour rot, Crop Protection, C 35, S 41-46, 2012.
- [11] Ameziane, N., Boubaker H., Boudyach H., Msanda F., Jilal A., Benaoumar A.A., Antifungal Activity of Moroccan Plants Against Citrus Fruit Pathogens, Agron. Sustain. Dev., C 27, S 273-277, 2007.
- [12] Soyulu, E.M., Kurt Ş., Soyulu S., *In vitro* and *in vivo* antifungal activities of the essential oils of various plants against tomato grey mould disease agent *Botrytis cinerea*, International Journal of Food Microbiology, C 143, S 183-189, 2010.
- [13] CLSI, Clinical and Laboratory Standarts Institute, formerly NCCLS, National Committee for Clinical and Laboratory Standarts. Reference method for broth dilution antifungal susceptibility testing of yeasts; Approved Standart, 2nd edition, NCCLS document M27-A2, NCCLS, Wayne, PA. Reference method for broth dilution antifungal susceptibility testing of filamentous fungi; Approved Standart, 1st edition, NCCLS document M 38 A, Wayne, PA., 2002.
- [14] Lima, J.C., Gomes S.M., Lima E.O., Pereira F.O., Lima I.O., Carvacrol and thymol as potential preservatives against *Aspergillus* in maize grains, Emirates Journal of Food and Agriculture, C 31(11), S 825-829, 2019.
- [15] Abdel-Monaim, M.F., Abo-Elyousr, K.A.M., Morsy, K.M., Effectiveness of plant extracts on suppression of damping-off and wilt diseases of lupine (*Lupinus termis* Forsik), Crop Protection, C 30, S185-191, 2011.

- [16] Cutter, C. N., Antimicrobial effect of herb extracts against Escherichia coli O157:H7, Listeria monocytogenes, and Salmonella typhimurium associated with beef, Journal of Food Protection, C 63, S 601–607, 2000.
- [17] Askarne, L., Talibi I., Boubaker H., Boudyach E.H., Msanda F., Saadi B., Serghini M.A., Ait Ben Aoumar A., In vitro and in vivo antifungal activity of several Moroccan plants against *Penicillium italicum*, the causal agent of citrus blue mold” Crop Protection, C 40, S 53-58, 2012.
- [18] Njoki L.M., Okoth S.A., and Peter M., Wachira Effects of Medicinal Plant Extracts and Photosensitization on Aflatoxin Producing Aspergillus flavus (Raper and Fennell), International Journal of Microbiology, Article ID 5273893, 9 pages <https://doi.org/10.1155/2017/5273893>, 2017.
- [19] Jeff-Agboola Y.A., Awe L.B., Antifungal and phytochemical screening of some Nigerian medicinal plant extracts against toxigenic Aspergillus flavus, Cogent Food & Agriculture, 2, 1210556 <http://dx.doi.org/10.1080/23311932.2016.1210556>, 2016.

VHDL ile NIBP, SpO₂ ve ETCO₂ Yaşamsal Sinyallerin FPGA Tabanlı Tasarımı ve Gerçek Zamanlı Uygulaması

İsmail Koyuncu¹, Fatih Karataş², Murat Alçın³, Murat Tuna^{4*}

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye

³Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye

⁴Elektrik ve Enerji Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye

Geliş: 21.07.2023, Kabul: 02.12.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

ÖZ

Son yıllarda, FPGA-tabanlı yaklaşımlar, biyomedikal mühendislik uygulamalarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Sunulan bu çalışmada, NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ yaşamsal belirti sinyalleri Zynq-7000 serisi XC7Z020 FPGA çipi üzerinde, gerçek zamanlı biyomedikal uygulamalarında kullanılmak amacı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada öncelikle, NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyalleri MATLAB ortamında nümerik olarak modellenmiştir. Sinyallerin sayısal modelleri, MIT-BIH aritmi veri bankası Physiobank ATM kısmında bulunan yaşamsal belirti sinyallerinin zaman ve genlik değerleri için uyumlu ve özgün olarak çıkartılmıştır. Ardından, bu sinyallerin bulunduğu FPGA-tabanlı sistem, VHDL ile Xilinx Vivado yazılımında tasarlanmıştır. Tasarımın matematiksel modelleri baz alınarak, FPGA-tabanlı sistemin ürettiği sonuçlar ve hata analizleri verilmiştir. Sonrasında, NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyallerini içeren tasarım Xilinx-Vivado ile Zynq-7000 XC7Z020 FPGA çipi için sentezlenmiş ve Place&Route işleminin sonucunda kaynak tüketim istatistikleri sunulmuştur. FPGA-tabanlı tasarımların maksimum çalışma frekansı 651,827 MHz olarak elde edilmiştir. FPGA-tabanlı tasarımı yapılan NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ yaşamsal belirti sinyalleri, geliştirme kitiyle çalışan 2 adet 14-bit AN9767 DA kartıyla 4 kanala sahip bir osiloskop üzerinden gerçek zamanlı gözlemlenmiştir. Çalışma ile FPGA-tabanlı tasarımı yapılarak doğrulanan NIBP, SpO₂ ve ETCO₂ yaşamsal belirti sinyallerinin biyomedikal uygulamalarda ve tıbbi cihazların kalibrasyon testleri için kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kalibrasyon; FPGA; ETCO₂; SPO₂; NIBP; VHDL

FPGA-based Design and Real-time Implementation of NIBP, SpO₂ and ETCO₂ Vital Signals with VHDL

ABSTRACT

In recent years, FPGA-based approaches have been used extensively in biomedical engineering applications. In this study, NIBP, ETCO₂ and SpO₂ vital signals have been performed on the Zynq-7000 series XC7Z020 FPGA chip for use in real-time biomedical applications. First of all, NIBP, ETCO₂ and SpO₂ signals have been numerically modeled in MATLAB environment. The numerical models of the signals have been obtained in accordance with the time and amplitude values of the vital signals in the MIT-BIH arrhythmia database Physiobank ATM. Then, the FPGA-based system including these signals has been designed using VHDL in Xilinx Vivado software. Based on the mathematical models of the design, the results and error

analyze produced by the FPGA-based system are given. Afterwards, the design including NIBP, ETCO₂ and SpO₂ signals has been synthesized for the Xilinx-Vivado and Zynq-7000 XC7Z020 FPGA chip, and because of the Place&Route process, resource consumption statistics of the system have been presented. The maximum operating frequencies of FPGA-based designs are 651,827 MHz. FPGA-based designed NIBP, ETCO₂ and SpO₂ vital signals have been observed in real time from a 4-channel oscilloscope by means of 2 14-bit AN9767 DA modules working in harmony with the development board. In this study, it has been shown that NIBP, SpO₂ and ETCO₂ vital signals, which have been verified by FPGA-based design, can be used in biomedical applications and for calibration tests of medical devices.

Keywords: Calibration; FPGA; ETCO₂; SPO₂; NIBP; VHDL

1. GİRİŞ

Günümüzde küresel FPGA (Field Programmable Gate Arrays-Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri) pazarı 9 milyar \$ seviyesinde olmakla birlikte bu değer 2027 yılına kadar 16 milyar \$ seviyesine ulaşması beklenmektedir. FPGA çipleri, hızlı ilk üretim, tekrar tekrar programlanabilme, paralel sinyal işleme ve düşük güç tüketimi gibi üstünlüklere sahip olduğundan diğer sayısal sinyal işleme platformlarına göre daha fazla tercih edilmektedir. Her geçen gün kullanım alanı artan FPGA çipleri gömülü sistem [1], haberleşme [2], kriptoloji [3], rasgele sayı üreteçleri [4], kontrol [5], görüntü işleme[6], otomotiv [7], yapay zekâ ve uygulamaları [8], [9], nonlinear osilatörler [10], tüketici elektroniği [11], enerji [12], savunma sanayi [13], endüstriyel uygulamalar [14], tersine mühendislik [15], biyomedikal [16], [17] olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışma alanlarından biri olan biyomedikal alanında da son yıllarda yoğun bir şekilde FPGA tabanlı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların bir bölümü biyomedikal mühendislik uygulamalarında kullanılan sinyallerin FPGA çipleri üzerinde modellenmesidir [18]. Literatürde biyomedikal sinyallerin FPGA-tabanlı modellenmesi alanındaki çalışmalardan birisi olan Madiraju ve arkadaşları, Virtex-6 FPGA ile Pan-Tompkins yöntemi ile EKG (Elektrokardiyografi) sinyalleri üzerinde QRS genişliği (Ventriküller Arası İleti Gecikmesi) tespiti yapılmıştır [19]. EKG sinyalleri üzerinde yapılan diğer bir çalışmada, Meddah ve arkadaşları tarafından Xilinx Nexys-4 ile QRS tespiti ve kalp hızı hesaplaması yapılmıştır [20]. Literatürde sunulan bir diğer çalışmada, Zairi ve arkadaşları Artix7 serisi Xilinx FPGA çipi ile yapay sinir ağları-tabanlı EKG sinyali sınıflandırılması işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir [21]. Karataş ve arkadaşları, Normal Sinüs Ritmi sinyalini VHDL ile modellemişlerdir. Modellenen sinyal Zynq-7000 XC7Z020 FPGA bordu üzerinde Xilinx-Vivado programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [22]. Bir diğer çalışmada, Giorgio ve arkadaşları Altera Cyclone-V FPGA kiti ile Ventriküler geç potansiyellerinin saptanması işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirmişler ve çalışmadan elde ettikleri sonuçları sunmuşlardır [23]. 2020 yılında Jain tarafından yapılan bir çalışmada, ZedBoard (Zynq-7000) FPGA kartı ile EKG sinyallerinin R-R aralığı ile kalp atış hızı hesaplanmıştır [24]. Zhu ve arkadaşlarının 2021 yılında literatüre sundukları çalışmada, FPGA üzerinde, veri toplama, analog-sayısal çevrim, ön-uç ve elektrotlardan oluşan 8 kanallı EKG sinyal sistemi yapısı tasarlanmıştır [25]. Diğer bir çalışmada Karataş ve arkadaşları 8 tane yaşamsal aritmik EKG sinyallerini FPGA üzerinde VHDL ile tasarlayarak Matlab tabanlı EKG sinyallerini referans alarak elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Sundukları çalışma ile FPGA tabanlı EKG sinyal üretim sisteminin FPGA çipleri üzerinde uygulanabileceği ve tasarlanan sistemin EKG simülatörlerinde güvenle kullanılabileceğini gösterilmişlerdir [26].

Sunulan bu çalışmada, literatürde verilen çalışmalardan farklı olarak, yaşamsal işaretlerden ETCO₂ (End Tidal Carbon dioxide-Soluk sonu Karbondioksit), SPO₂ (Peripheral Oxygen Saturation- Periferik Oksijen Satürasyonu) ve NIBP (Noninvaziv Blood Pressure- Noninvaziv Kan Basıncı) sinyaller önce nümerik olarak

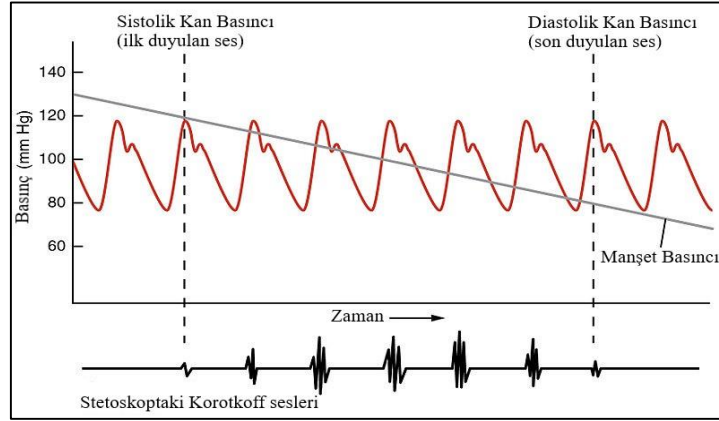
Matlab ortamında tasarlanmış ve sonra VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language-Yüksek Hızlı Tümlleşik Devreler için Donanım Tanımlama Dili) ile Xilinx-Vivado ortamında FPGA tabanlı modellenmesi yapılmıştır. Çalışmanın İkinci Bölümünde, FPGA çipleri, tasarımı yapılan yaşamsal ETCO₂, SPO₂ ve NIBP ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmiştir. Makalenin Üçüncü Bölümünde, nümerik-tabanlı yaşamsal belirti sinyallerinin matematiksel modeli ve bu model kullanılarak elde edilen sinyallere ait grafikler sunulmuştur. Dördüncü Bölümde, yaşamsal belirti sinyallerinin tasarımı VHDL dili ile kodlanmıştır. Xilinx Vivado programı üzerinde bu sinyallerin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ardından ilgili tasarım Zynq-7000 XC7Z020 FPGA çipinde kullanılmak üzere sentezlenmiştir, 14-bit AD9767-DAC (Digital-Analog Converter- Dijital Analog Dönüştürücü) kitiyle 4 kanala sahip bir osiloskop üzerinde gerçek zamanlı gözlemlenmiştir. Matlab-tabanlı yaşamsal belirti sinyalleri referans olarak alınarak FPGA tabanlı yaşamsal belirti sinyalleri tasarımından alınan çıkış değerleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise tasarımdan elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Tıbbi cihazların fonksiyonel testi ve kalibrasyonu, periyodik olarak yapılması gereken rutin bir işlemdir. Bu çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar göstermiş ki, donanımsal olarak tasarlanan FPGA-tabanlı yaşamsal sinyal üretim sisteminin, FPGA çipleri kullanılarak tasarlanabileceği ve biyomedikal kalibrasyon uygulamalarında önemli rol oynayan EKG simülatörlerinde güvenli bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

2. MATERYOL VE METOT

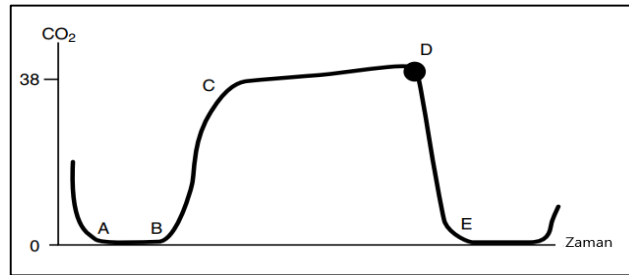
2.1. Yaşamsal Belirti Sinyalleri

Sunulan çalışmada, FPGA-tabanlı biyomedikal uygulamalarda kullanılmak üzere NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyalleri kullanılmıştır. NIBP, dolaşım sisteminde bulunan atardamarlar içindeki en yaygın fizyolojik ölçümlerden biri olan ve kardiyovasküler sistem ile ilgili büyük öneme sahip bilgi sunan kan basıncıdır [27]. Bu sinyalin zamana göre basınç değişimini gösteren grafik Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1: NIBP sinyali.

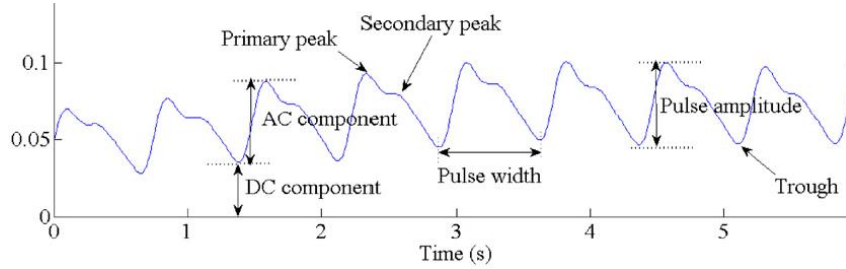
FPGA-tabanlı tasarımı yapılan sinyallerden birisi olan ETCO₂ sinyali örneği Şekil 2’de verilmiştir. Bu sinyal dört adet segmentten oluşmaktadır. Birinci segment olan A-B segmenti, sıfır taban çizgisini ifade etmektedir. İkinci segment olan B-C segmenti, ara hava yollarından gelen gaz ile ilgili hızlı, keskin yükselişi belirtmektedir. Üçüncü segment olan C-D segmenti, alveolar gaz tespitiyle ilgili düz alveolar platoyu ifade etmektedir. D noktası, alveoldeki soluk sonu karbondioksit konsantrasyonudur. Dördüncü segment olan D-E segmenti, karbondioksit içermeyen taze gazın inspirasyonunu (dışarıdan havanın akciğerlere alınması) ifade eder. İnsan anestezisi ve yoğun bakımda, standart bir işlem olarak değerlendirilen solunum gazı analizi, klinisyene pulmoner sistemin küresel fizyolojisi ve sağlığı hakkında önemli bilgiler vermektedir [27].



Şekil 2: ETCO₂ sinyali.

Oksijen doygunluğu olarak da tanımlanan SpO₂, bireyin kan dolaşımındaki oksijen miktarını tanımlamaktadır. SpO₂ sinyali örneği Şekil 3’te verilmiştir. Oksijen satürasyonu, birey muayenesinde gerçekleştirilen ölçümlerden biridir. Kalp normal şartlarda bir yetişkin için dokulara yaklaşık 5000 ml/dk kan pompalamakta ve bu şekilde dokulara 1000 ml/dk oksijen vermektedir. Kandaki oksijen miktarının

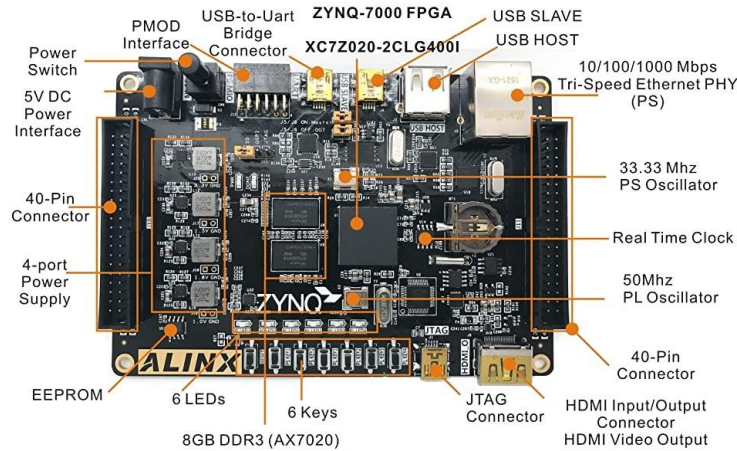
oldukça düşük olması nedeniyle insan vücudunun stabil çalışmama haline hipoksemi adı verilmektedir. Bu durumun sonucu olarak, birey ciddi sağlık sorunları yaşayabilmektedir [27].



Şekil 3: SpO₂ sinyali.

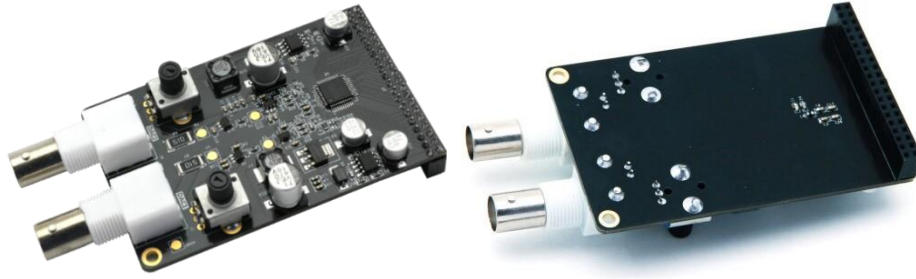
2.2. FPGA Kartı ve Sistem Komponentleri

Günümüzde sayısal sistemlerin tasarlanması amacı ile kullanılan Programlanabilir Lojik Araçların (Programmable Logic Devices (PLD)) en önemli uygulaması olan FPGA çipleri, paralel çalışma, düşük güç tüketimi, hızlı ilk prototipleme, yüksek performans ve yüksek çalışma frekansı gibi avantajlarından dolayı birçok uygulamada oldukça yaygın bir şekilde kullanım alanı bulmaktadır. Son yıllarda FPGA çip üretimi konusunda önde firmalardan olan Xilinx (AMD) ve Altera (Intel) firmaları, saf FPGA mimarisi ile ARM mimarilerinin birlikte koşturulduğu hibrit FPGA platformları geliştirmektedirler. Xilinx firmasının bu kapsamda geliştirdiği mimarilerden birisi olan Zynq-7000, aynı cihazın içerisinde bulunan yeniden programlanabilir mantığa sahip çift çekirdekli Cortex-A9 işlemci ile uyumlu çalışmaktadır. Bu platform tek/çift çekirdekli ARM Cortex-A9 işlem sistemini (Processing System (PS)) ve programlanabilir lojik (PL)) yapılarını birleştirmektedir. Bu yapı kullanılarak Alinx firması tarafından geliştirilen ALINX AX7020 FPGA geliştirme kartına ait görsel Şekil 4'te verilmiştir [28].



Şekil 4: ALINX-AX7020-Zynq-7000-SoC-XC7Z020 FPGA geliştirme kiti.

FPGA çiplerinden elde edilen sinyallerin osiloskop üzerinde gözlenebilmesi ve sayısal sinyallerin analog sinyale dönüştürülebilmesi amacı ile projede 14-bit AD9767/AN9767 Dijital Analog Dönüştürücü (Digital Analog Converter (DAC)) kullanılmıştır. Bu DAC modülü, 125 MPS DA'yı destekleyen ve 14-bit çift bağlantı noktalı olup ve bağımsız çift bağlantı noktaları içermektedir. Modül üzerinde, FPGA çipi tarafından üretilen sayısal sinyalin osiloskop üzerine aktarılabilmesi için 40 pimli bir dişi başlık bulunmaktadır. Bu modüle ait görsel Şekil 5'te sunulmuştur [29].



Şekil 5: 14-bit Çift Bağlantı Noktalı DAC Çıkış Modülü.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Yaşamsal Belirti Sinyallerinin sayısal tabanlı tasarımı

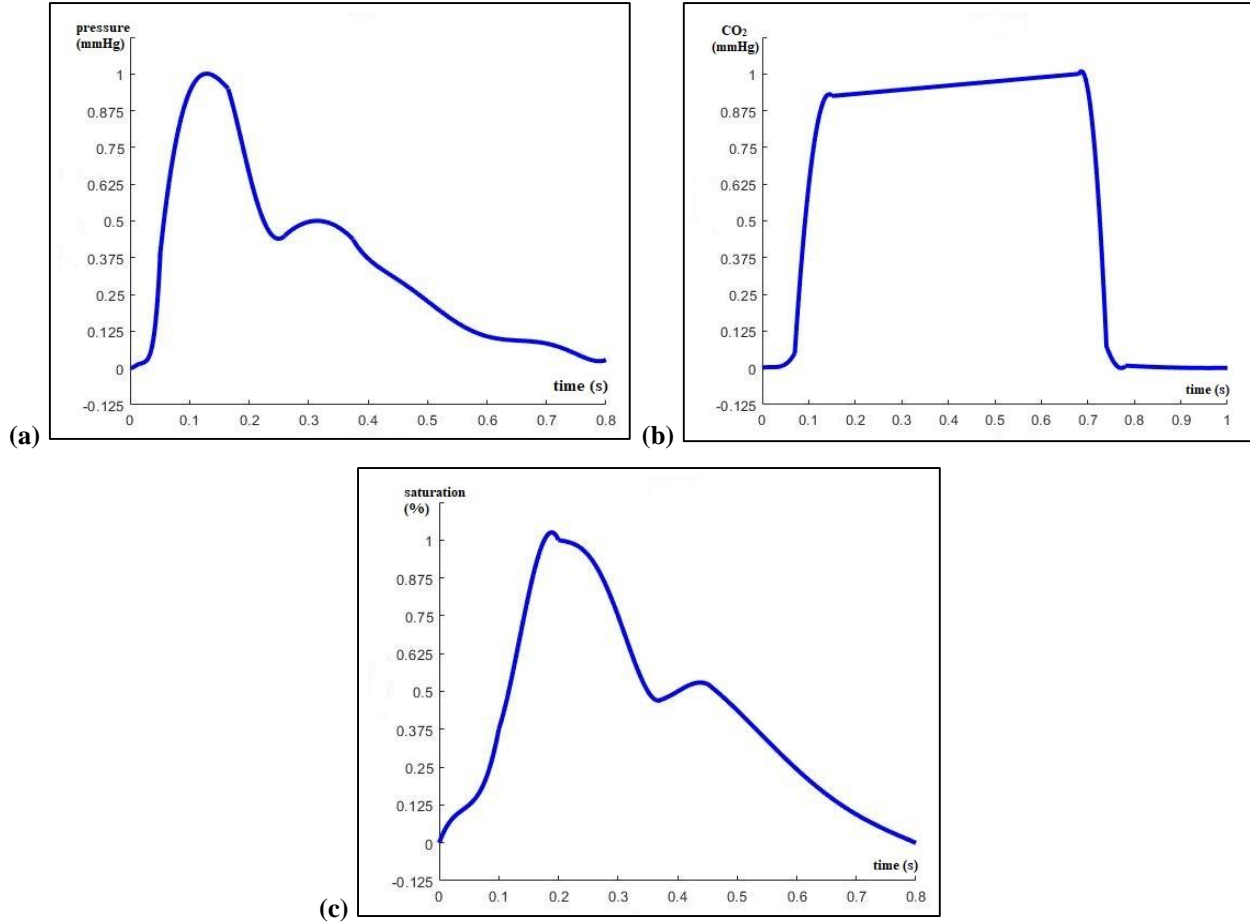
75 vuru/dk. kalp hızında parametresi olan bireyin tansiyonunu ifade eden ve numerik olarak modellenen NIBP sinyaline ilişkin matematiksel eşitlik parçalı fonksiyon halinde Çizelge 1'de bulunan denklem 1-5'te verilmiştir.

Çizelge 1: Matlab'da tasarlanan NIBP sinyali için matematiksel denklemler.

$x = 0.000:0.001:0.050 ;$	
$y_1 = 83333.3333*x^4 - 4583.3333*x^3 + 79.1667*x^2 - 0.0833*x ;$	(1)
$x = 0.050:0.001:0.165 ;$	
$y_2 = 212.29*x^3 - 105.45*x^2 + 16.608*x - 0.443 ;$	(2)
$x = 0.165:0.001:0.260 ;$	
$y_3 = -2329.6*x^4 + 2240.5*x^3 - 769.18*x^2 + 110.11*x - 5.1856 ;$	(3)
$x = 0.260:0.001:0.375 ;$	
$y_4 = -6.8227*x^2 + 4.289*x - 0.4739 ;$	(4)
$x = 0.375:0.001:0.800 ;$	
$y_5 = 1428.4*x^6 - 5027.1*x^5 + 7264*x^4 - 5514.4*x^3 + 2320.2*x^2 - 513.88*x + 47.059 ;$	(5)

Matematiksel çıkarımı elde edilip basınç-genlik değerlerine ilişkin olarak tasarımı yapılan NIBP sinyaline ait Matlab model sonucu Şekil 6.(a)'da sunulmuştur. Aynı şekilde 60 vuru/dk. kalp hızına sahip bir kişinin soluk sonu CO₂ değerini gösteren parçalı fonksiyonlar kullanılarak Matlab'da matematiksel olarak zaman ve genlik değerine göre modellenen ETCO₂ sinyaline ait görsel Şekil 6.(b)'de sunulmuştur. 75 vuru/dk. kalp

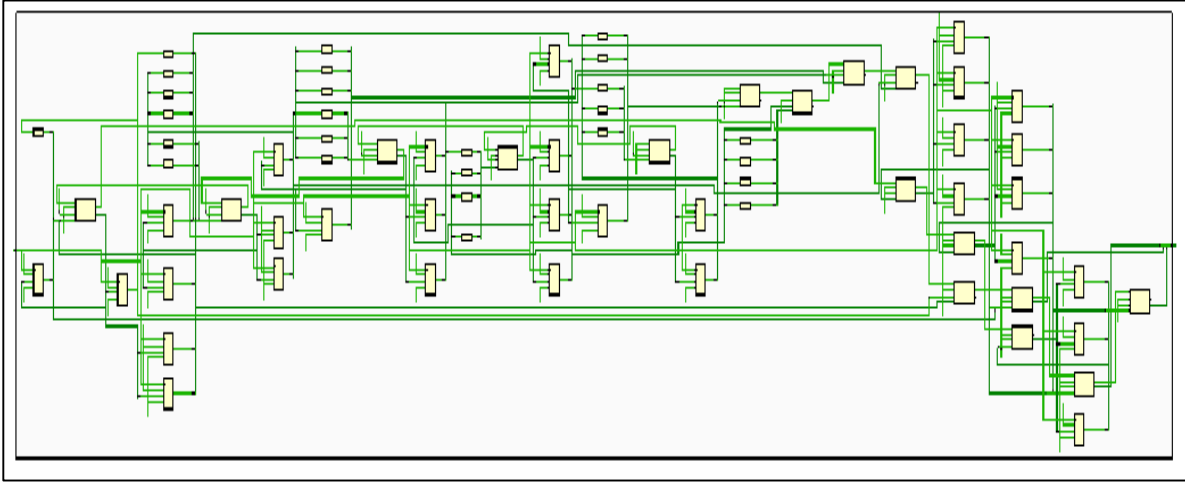
hızında parametresi olan bireyin Periferik Oksijen Satürasyonunu ifade eden matematiksel denklemler kullanılarak elde edilen zaman-genlik değerlerine göre tasarımı yapılan SPO₂ sinyaliyle ilişkili sinyal Şekil 6.(c)'de verilmiştir.



Şekil 6: (a) Nümerik tabanlı NIBP sinyali, (b) ETCO₂ sinyali, (c) SpO₂ sinyali.

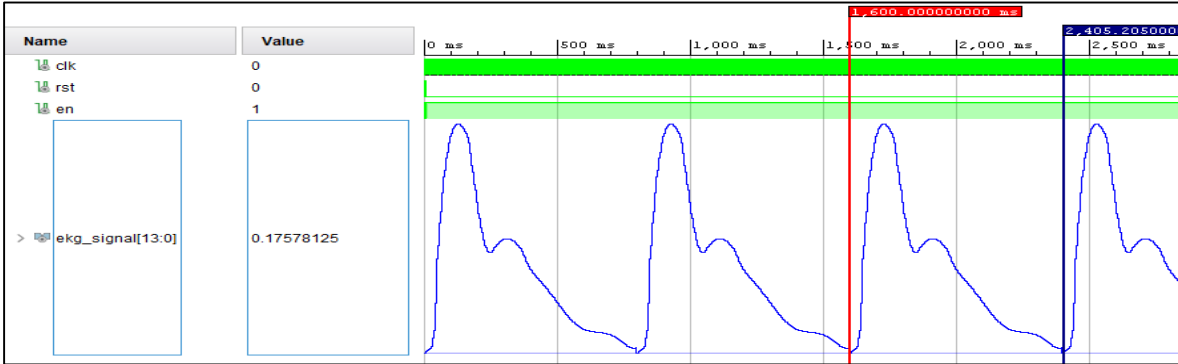
3.2. Yaşamsal Belirti Sinyallerinin FPGA tabanlı tasarımı

Bu bölümde, VHDL dili kullanılarak Xilinx-Vivado programında 3 adet yaşamsal belirti sinyalinin tasarımı yapılmıştır. Tasarımın en üst seviye tasarımında sistemin senkron bir şekilde çalışmasını sağlamak amacı ile 1-bit clk sinyali kullanılmıştır. Sinyallerin üretiminin kontrollü bir şekilde elde edilmesi için kullanıcı butonları giriş olarak verilmiştir. Sistemin çıkışında üretilen sinyallerin osiloskop üzerinde görüntülenebilmesi amacı ile 14-bitlik çıkış sinyalleri ve DAC için kontrol sinyalleri çıkışları bulunmaktadır. FPGA-tabanlı yaşamsal belirti sinyallerine ait tasarımın blok RTL şeması Şekil 7'de sunulmuştur.

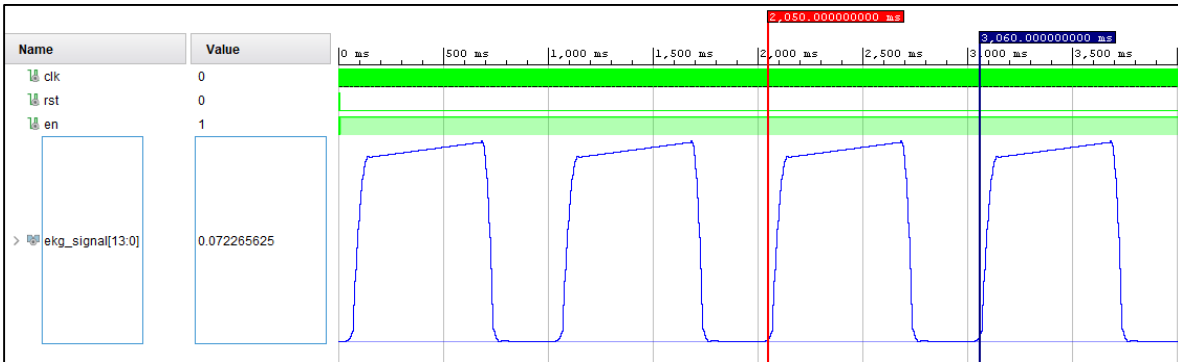


Şekil 7: Parametrelere göre yaşamsal belirti sinyallerini üreten bloğun RTL şeması.

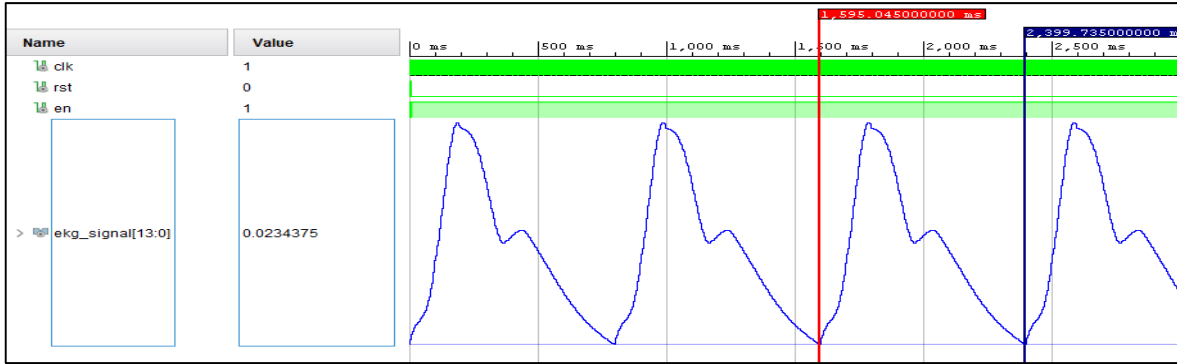
Tasarımın doğrulanabilmesi amacı ile VHDL dilinde bir testbench oluşturulmuştur. Oluşturulan testbench Xilinx Vivado Design Suite programı üzerinde çalıştırılarak Şekil 8’da NIBP sinyali, Şekil 9’da ETCO₂ sinyali ve Şekil 10’de SpO₂ sinyali için simülasyon sonuçları sunulmuştur.



Şekil 8: NIBP Sinyalinin Vivado Simülasyonu.



Şekil 9: ETCO₂ Sinyalinin Vivado Simülasyonu.

Şekil 10: SpO₂ Sinyalinin Vivado Simülasyonu.

FPGA-tabanlı NIBP sinyali tasarımının doğrulanabilmesi amacıyla nümerik tabanlı NIBP sinyali referans alınmıştır. VHDL ile tasarlanan ve Vivado programı ile simüle edilen NIBP sinyaline ait değerler bir dosyaya kaydedilmiştir. Çizelge 2’de NIBP sinyalinin nümerik modeli ve Vivado programında elde edilen zaman ve genlik değerlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Karşılaştırma sonuçlarına göre, FPGA-tabanlı NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyallerinin maksimum MSE hata değerleri sırasıyla 1,6671E-06, 4,9464E-06 ve 1,0472E-06 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 2: NIBP sinyalinin Matlab ve Vivado ortamında zaman-genlik değerlerine göre karşılaştırılması.

NIBP	Zaman (s)	Basınç (mmHg)	
	Matlab ve Vivado	Matlab	Vivado
Denklem 1	0,00000	0,000000	0,000000
	0,02000	0,016668	0,016479
	0,04000	0,108337	0,106812
Denklem 2	0,06000	0,533501	0,527954
	0,08000	0,788964	0,788879
	0,10000	0,934153	0,935669
	0,12000	0,994542	0,994263
	0,14000	0,995607	0,994568
	0,16000	0,962821	0,963440
Denklem 3	0,18000	0,851290	0,848694
	0,20000	0,680999	0,682373
	0,22000	0,536242	0,535278
	0,24000	0,453292	0,453796
Denklem 4	0,26000	0,446059	0,446167
	0,28000	0,476635	0,476379
	0,30000	0,495274	0,495300
	0,32000	0,500267	0,500488

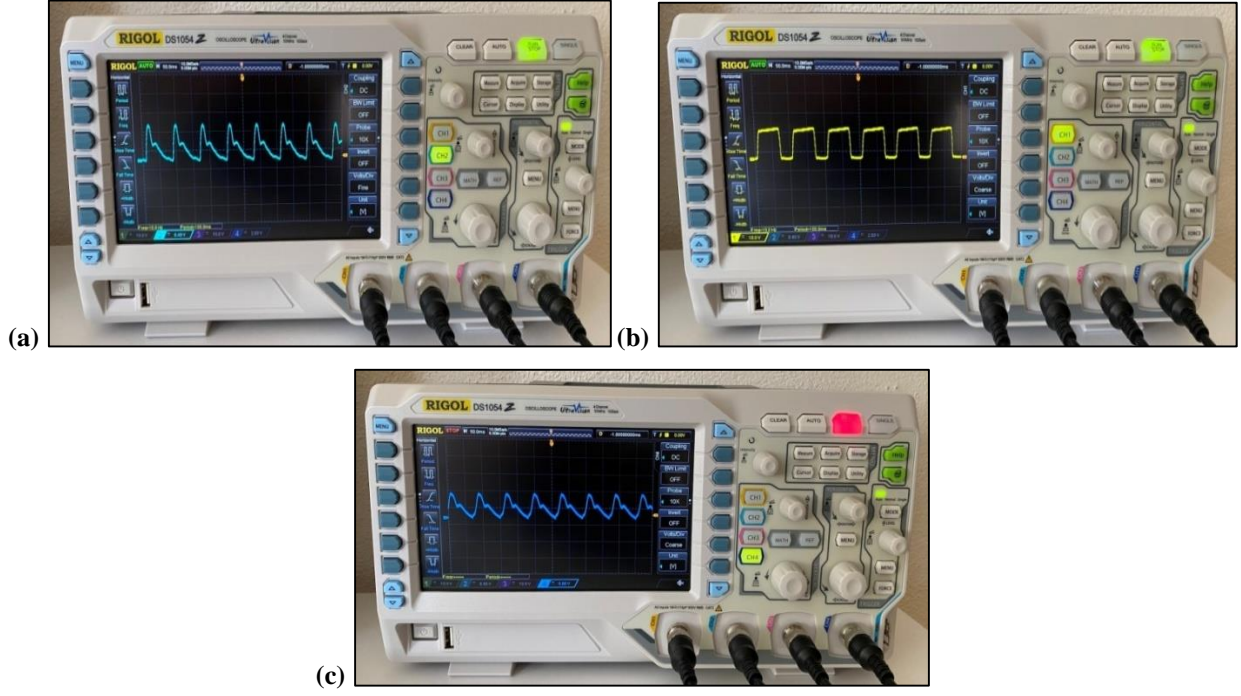
	0,34000	0,469317	0,468750
	0,36000	0,433001	0,432434
	0,38000	0,380433	0,381165
	0,42000	0,318858	0,318298
	0,46000	0,263873	0,263367
	0,50000	0,202321	0,202026
	0,54000	0,146470	0,146484
Denklem 5	0,58000	0,110174	0,110168
	0,62000	0,095556	0,095520
	0,66000	0,090231	0,090027
	0,70000	0,075048	0,074768
	0,74000	0,042378	0,042114
	0,80000	0,027404	0,027466

VHDL dili ile FPGA çipi üzerinde çalışmak için tasarlanan NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyalleri Zynq-7000 XC7Z020 FPGA çipinde kullanmak amacıyla sentezlenmiştir. Sonrasında Place&Route sürecinden sonra elde edilen FPGA kaynak tüketimi parametreleri Çizelge 3'te sunulmuştur. NIBP sinyalinin maksimum çalışma frekansı 651,827 MHz değerinde elde edilmiştir. 14-bit AN9767-DAC kiti üzerinden Şekil 11'de gösterildiği şekliyle osiloskop ile incelenmiştir.

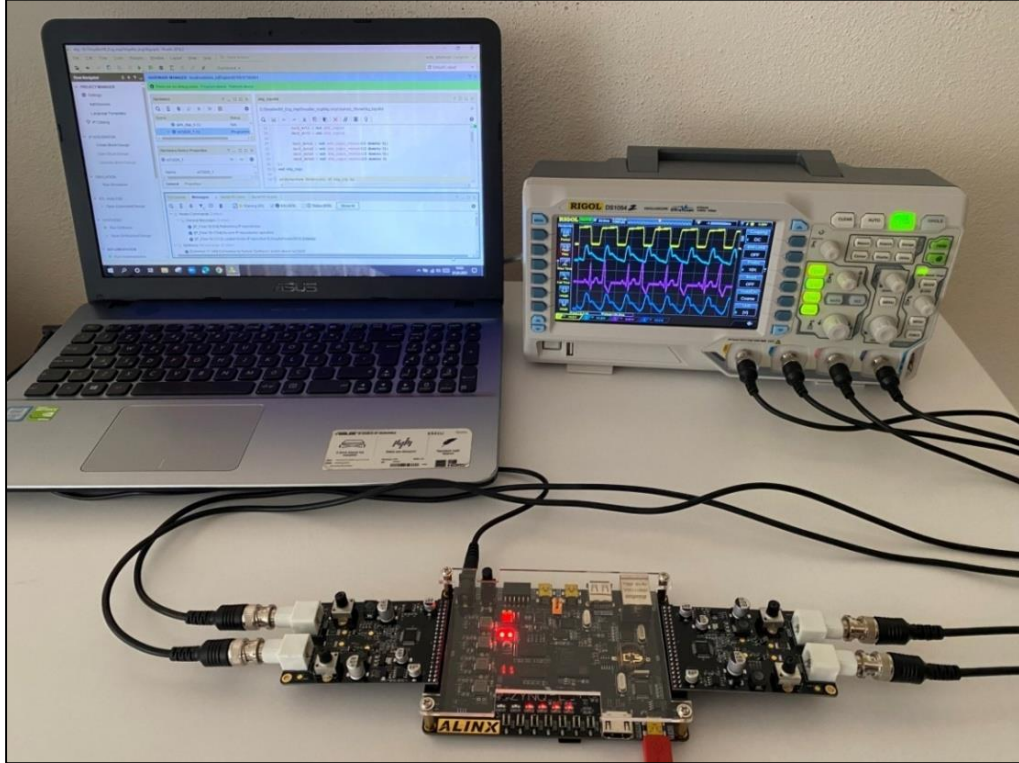
Çizelge 3: FPGA-tabanlı yaşamsal belirti sinyallerinin çip kullanım istatistikleri.

Logic Utilization / Usage rate	NIBP	ETCO ₂	SpO ₂
Number of BUFGCTLs	2 / %6,25	2 / %6,25	2 / %6,25
Number of Slice LUTs	40 / %0,075	40 / %0,075	40 / %0,075
Maximum Operating Frequency (MHz)	651,827	651,827	651,827

Zynq-7000-XC7Z020 FPGA kiti ile çalışan 2 adet 14-bit AN9767-DAC kartı ile 4 kanala sahip bir osiloskoptan elde edilen NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyal çıkışları sırasıyla, Şekil 11 (a), (b), (c)'de verilmiştir. Ayrıca, bu sinyallerle ilgili tasarımı yapılan sistemin osiloskop çıkışları ve sistem bileşenleri (Bilgisayar, Zynq-7000-XC7Z020 FPGA kiti ve 2 tane 14-bit-AN9767 DAC, 4 kanal osiloskop) Şekil 12'de sunulmuştur.



Şekil 11: (a) NIBP sinyaline ait osiloskop sonucu, (b) ETCO₂ sinyaline ait osiloskop sonucu, (c) SpO₂ sinyaline ait osiloskop sonucu.



Şekil 12: Tasarıma ait sistem komponentleri ve ETCO₂, NIBP ile SPO₂ sinyalleri osiloskop sonuçları.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, biyomedikal uygulamalarda kullanılmak amacı ile 3 adet NIBP, SpO₂ ve ETCO₂ yaşamsal belirti sinyalleri Zynq-7000 serisi XC7Z020 FPGA çipi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ilk olarak, 3 adet NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyalleri sayısal olarak modellenmiştir. Sonrasında bu sinyalleri içeren sistem tasarımı VHDL dilinde Xilinx Vivado Design Suite programı kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarımın matematiksel modelleri referans alınarak tasarımdan elde edilen sonuçlar ve hata analizleri sunulmuştur. Tasarım işleminin ardından, NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyallerini içeren tasarım Xilinx-Vivado ile Zynq-7000-XC7Z020 FPGA çipinde kullanılması amacıyla sentezlenmiştir. Place-Route işleminden sonrasında Zynq-7000-XC7Z020 FPGA çipi için kaynak tüketim istatistikleri ve FPGA-tabanlı sistemin maksimum çalışma frekansı sunulmuştur. FPGA-tabanlı tasarımların maksimum çalışma frekansı 651,827 MHz olarak elde edilmiştir. Gerçek zamanlı tasarımı yapılan NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ yaşamsal belirti sinyallerinin tasarımı, geliştirme kartıyla uyumlu olan 2 adet 14-bit-AN9767-DA modülü ile 4 kanala sahip bir osiloskop üzerinden gerçek zamanlı gözlemlenmiştir.

Sunulan çalışma ile FPGA-tabanlı tasarımı yapılarak doğrulanan NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ yaşamsal belirti sinyallerinin FPGA çipleri kullanılarak tasarlanabileceği, biyomedikal kalibrasyon uygulamalarda ve tıbbi cihazların kalibrasyon testleri için kullanılmakta olan EKG simülatörlerinde uygulanabileceği gösterilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 119E659 numaralı proje ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir.

YAZARLARIN KATKILARI

B.Y.: Kavramsallaştırma, yöntem, yazılım formel analiz, araştırma, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

İ.Y.: Yöntem, yazılım, doğrulama, araştırma, kaynaklar ve düzenleme.

Ü.Y.: Analiz, doğrulama, araştırma, düzenleme, gözden geçirme.

D.Y.: Kaynaklar, düzenleme, yazı yazma- orijinal taslak hazırlama.

KAYNAKLAR

- [1] E. Coşgun, H. Korkmaz, and K. Toker, “An Embedded System Design to Build Real-Time 2D Maps for Unknown Indoor Environments,” *Sakarya University Journal of Science*, vol. 23, no. 4, pp. 617–632, Aug. 2019, doi: 10.16984/SAUFENBILDER.453926.
- [2] R. F. Molanes, L. Costas, J. J. Rodríguez-Andina, and J. Fariña, “Comparative Analysis of Processor-FPGA Communication Performance in Low-Cost FPSoCs,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 17, no. 6, pp. 3826–3835, Jun. 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3015833.
- [3] H. Li, Y. Tang, Z. Que, and J. Zhang, “FPGA Accelerated Post-Quantum Cryptography,” *IEEE Trans Nanotechnol*, vol. 21, pp. 685–691, 2022, doi: 10.1109/TNANO.2022.3217802.
- [4] İ. Koyuncu, M. Tuna, İ. Pehlivan, C. B. Fidan, and M. Alçın, “Design, FPGA implementation and statistical analysis of chaos-ring based dual entropy core true random number generator,” *Analog Integr Circuits Signal Process*, vol. 102, no. 2, pp. 445–456, Feb. 2020, doi: 10.1007/s10470-019-01568-x.
- [5] J. ; Wang *et al.*, “A Design of FPGA-Based Neural Network PID Controller for Motion Control System,” *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 889, vol. 22, no. 3, p. 889, Jan. 2022, doi: 10.3390/S22030889.
- [6] İ. Koyuncu, M. Furkan Taşdemir, M. Alçın, M. Tuna, E. Coşgun, and G. Tarihi, “FPGA üzerinde görüntü işleme algoritmalarının gerçek zamanlı gerçekleştirilmesi,” *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 24, no. 1, pp. 125–137, Jan. 2022, doi: 10.25092/BAUNFBED.892032.
- [7] J. M. Blanes, R. Gutiérrez, A. Garrigós, J. L. Lizán, and J. M. Cuadrado, “Electric vehicle battery life extension using ultracapacitors and an FPGA controlled interleaved buck-boost converter,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 28, no. 12, pp. 5940–5948, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2013.2255316.
- [8] C. Yilmaz, I. Koyuncu, M. Alcin, and M. Tuna, “Artificial Neural Networks based thermodynamic and economic analysis of a hydrogen production system assisted by geothermal energy on Field Programmable Gate Array,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 33, pp. 17443–17459, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2019.05.049.
- [9] M. Ş. AKÇAY, İ. KOYUNCU, M. ALÇIN, and M. TUNA, “FPGA Tabanlı LogSig ve TanSig Transfer Fonksiyonlarının IQ-Math Sayı Standardında Tasarımı ve Gerçeklenmesi,” *Journal of Materials and Mechatronics: A*, vol. 3, no. 2, pp. 225–239, Dec. 2022, doi: 10.55546/JMM.1094815.
- [10] M. Tuna, M. Alçın, İ. Koyuncu, C. B. Fidan, and İ. Pehlivan, “High speed FPGA-based chaotic oscillator design,” *Microprocess Microsyst*, vol. 66, no. 2019, pp. 72–80, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.MICPRO.2019.02.012.
- [11] B. H. Tietche, O. Romain, B. Denby, and F. De Dieuleveult, “FPGA-based simultaneous multichannel fm broadcast receiver for audio indexing applications in consumer electronics scenarios,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1153–1161, 2012, doi: 10.1109/TCE.2012.6414980.
- [12] I. Koyuncu, C. Yilmaz, M. Alcin, and M. Tuna, “Design and implementation of hydrogen economy using artificial neural network on field programmable gate array,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 41, pp. 20709–20720, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.181.
- [13] M. Ozev, Z. Ortatepe, and A. Karaarslan, “An FPGA-Based Comparative Analysis of Control Techniques for Gimbals and Fins of Missiles,” *Electrica*, vol. 22, no. 2, pp. 160–172, May 2022, doi: 10.54614/ELECTRICA.2022.21175.
- [14] E. Monmasson, L. Idkhajine, M. N. Cirstea, I. Bahri, A. Tisan, and M. W. Naouar, “FPGAs in industrial control applications,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 7, no. 2, pp. 224–243, 2011, doi: 10.1109/TII.2011.2123908.
- [15] H. Yu, H. Lee, S. Lee, Y. Kim, and H. M. Lee, “Recent Advances in FPGA Reverse Engineering,” *Electronics* 2018, Vol. 7, Page 246, vol. 7, no. 10, p. 246, Oct. 2018, doi: 10.3390/ELECTRONICS7100246.
- [16] F. Karataş, İ. Koyuncu, M. Alçın, and M. Tuna, “Design and implementation of FPGA-based arrhythmic ECG signals using VHDL for biomedical calibration applications,” *International Advanced Researches and Engineering Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 362–371, 2021, doi: 10.35860/iaej.918874.

- [17] E. Coşgun and A. Çelebi, “FPGA based real-time epileptic seizure prediction system,” *Biocybern Biomed Eng*, vol. 41, no. 1, pp. 278–292, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.BBE.2021.01.006.
- [18] F. Karataş *et al.*, “II. Derece AV Blok Aritmik EKG Sinyallerinin VHDL ile FPGA-Tabanlı Tasarımı,” *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 22, no. 6, pp. 1334–1345, Dec. 2022, doi: 10.35414/AKUFEMUBID.1141837.
- [19] N. S. Madiraju, N. Kurella, and R. Valapudasu, “FPGA Implementation of ECG feature extraction using Time domain analysis,” *ArXiv*, vol. abs/1802.03310, Feb. 2018, Accessed: Jul. 11, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1802.03310v1>
- [20] K. Meddah, M. K. Talha, M. Bahoura, and H. Zairi, “FPGA-based system for heart rate monitoring,” *IET Circuits, Devices & Systems*, vol. 13, no. 6, pp. 771–782, Sep. 2019, doi: 10.1049/IET-CDS.2018.5204.
- [21] H. Zairi, M. Kedir Talha, K. Meddah, and S. Ould Slimane, “FPGA-based system for artificial neural network arrhythmia classification,” *Neural Comput Appl*, vol. 32, no. 8, pp. 4105–4120, Apr. 2020, doi: 10.1007/S00521-019-04081-4/FIGURES/12.
- [22] F. Karatas, I. Koyuncu, M. Alçın, and M. Tuna, “Design of FPGA-based ECG Signal Using VHDL,” in *1st International Hazar Scientific Research Congress*, Baku, Azerbaijan: IKSAD Publishing, 2020, pp. 114–127. Accessed: Apr. 01, 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/344719133>
- [23] A. Giorgio, C. Guaragnella, and D. A. Giliberti, “Improving ECG signal denoising using wavelet transform for the prediction of malignant arrhythmias,” *Int J Med Eng Inform*, vol. 12, no. 2, pp. 135–150, 2020, doi: 10.1504/IJMEI.2020.106898.
- [24] S. Jain, “FPGA-Assisted Framework for Heart Rate Evaluation using ECG Signal Processing,” in *2020 IEEE 17th India Council International Conference, INDICON 2020*, New Delhi, India: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020. doi: 10.1109/INDICON49873.2020.9342125.
- [25] Y. Zhu *et al.*, “A Multi-channel ECG Acquisition System Based on FPGA,” *J Phys Conf Ser*, vol. 1924, no. 1, p. 012023, May 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1924/1/012023.
- [26] F. Karataş, I. Koyuncu, M. Tuna, M. Alçın, E. Avcioglu, and A. Akgul, “Design and implementation of arrhythmic ECG signals for biomedical engineering applications on FPGA,” *The European Physical Journal Special Topics* 2021 231:5, vol. 231, no. 5, pp. 869–884, Nov. 2021, doi: 10.1140/EPJS/S11734-021-00334-3.
- [27] F. Karataş, “VHDL ile FPGA-tabanlı EKG simülatorü tasarımı,” Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye, 2021.
- [28] “XILINX Zynq-7000 SoC FPGA Development Board XC7Z020-ALINX.” Accessed: Jul. 15, 2023. [Online]. Available: <https://alinx.com/en/detail/273>
- [29] “ALINX Dual Channel 14 bit 125MSPS DA BNC Analog Output Module AD9767-ALINX.” Accessed: Jul. 15, 2023. [Online]. Available: <https://alinx.com/en/detail/480>

Bulanık Mantık Algoritmaları ile Kaya Sınıflandırması

Ebru EFEOĞLU^{1*} 

¹*Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yazılım Mühendisliği Bölümü, KÜTAHYA*

Geliş: 01.08.2023, Kabul: 20.12.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

ÖZ

Kaya sınıflandırması tünel ve yeraltı çalışmalarının yanı sıra madencilik ve hidrokarbon araştırmalarında da önem teşkil eder. Kayaların türünün yanlış tespiti hem para hem de zaman kaybına yol açar. Bu çalışmada 4 farklı kaya sınıfının fiziksel ve mekanik özellikleri kullanılarak kaya sınıflandırması yapılmıştır. Sınıflandırma için Bulanık Sırasız Kural İndüksiyon Algoritması, Bulanık Kafes Akıl Yürütme, Çok Amaçlı Evrimsel Bulanık sınıflandırıcıları kullanıldı. Çok Amaçlı Evrimsel Bulanık MOE Bulanık sınıflandırıcısı, ENORA ve NSGA II algoritmalarına dayanmaktadır. Bu nedenle bu algoritmalar ayrı ayrı kullanılmıştır. Verilere sınıflandırma öncesi Sentetik Azınlık Aşırı Örnekleme Tekniği uygulanmış ve bu işlemten önceki ve işlem sonrasında sınıflandırma performansları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak Sentetik Azınlık Aşırı Örnekleme Tekniği ile sınıflandırma başarısının arttığı görülmüştür. Sınıflandırmada en başarılı algoritma FURIA algoritması olmuştur. Algoritmanın doğruluğu %93, hata değeri 0.16'dır.

Anahtar Kelimeler: Bulanık mantık algoritmaları; Kaya; Sınıflandırma; Yapay Zeka.

Rock Classification with Fuzzy Logic Algorithms

ABSTRACT

Rock classification is important in mining and hydrocarbon exploration as well as tunnel and underground work. Incorrect determination of the type of rocks leads to a waste of both money and time. In this study, physical and mechanical properties of 4 different rock classes have been used. For classification, Fuzzy Unordered Rule Induction Algorithm, Fuzzy Lattice Reasoning, Multi-objective Evolutionary Fuzzy classifiers have been used. The MOE Fuzzy classifier is based on the ENORA and NSGA II algorithms. Therefore, these algorithms have been used separately. The Synthetic Minority Oversampling Technique has been applied to the data before classification and the classification performances have been compared before and after this process. As a result, it has been observed that the classification success increased with the Synthetic Minority Oversampling Technique. The most successful algorithm in classification has the FURIA algorithm. The accuracy of the algorithm is 93% and the error value is 0.16.

Keywords: Fuzzy logic algorithms; Rock; Classification; Artificial Intelligence

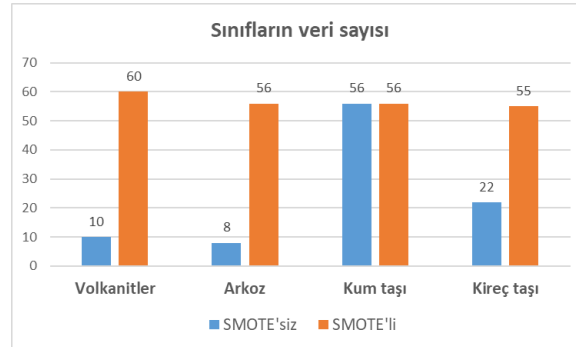
1. GİRİŞ

Yeraltı yapıları, tünel baraj gibi mühendislik projeleri için kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekir. Kayalar bu fiziksel ve mekanik özelliklerine göre sınıflandırılırlar. Bu projelerdeki tehlikelerin çoğu kayaların türünün yanlış tespit edilmesinden kaynaklanır [1]. Bu nedenle kaya sınıflandırması mühendislik projelerinde önemli bir yere sahiptir. Öncelikle kaya sınıflandırılmasında kayaların fotoğraf görüntüleri kullanıldı. Bu görüntüler derin bir evrişimli sinir ağına girdi olarak verilip kaya sınıfı belirlendi [2]. Birleştirilmiş evrişimli sinir ağlarına dayalı petrografik ince kesit görüntülerde kaya sınıflandırması yapıldı [3]. Karbonat kaya mikro CT görüntüleri kullanılarak litolojik sınıflandırması yapıldı [4]. Gama ışını, öz direnç, nötron-yoğunluk gözeneklilik farkı, ortalama nötron yoğunluk ve jeolojik kısıtlama değişkenleri derin evrişimli sinir ağına girdi parametreleri olarak kullanıldı ve kuyulardaki litolojik fasiyes sınıflandırması yapıldı [5]. Tünel çalışmaları için derin öğrenme tabanlı kaya sınıflandırması yapıldı [6]. Kaya kütlesi sınıflandırmasında makine öğrenimi tekniklerinden faydalanıldı [7]. AdaBoost algoritması kullanılarak kaya kütlesi sınıfı tahmin edildi [8]. Dağ tünelinin kaya sınıflandırmasında sinir ağının uygulanabilirliği araştırıldı [9]. Kaya kütlesi özelliklerini tahmin etmek için kaya sınıflandırmasını yeniden gözden geçirildi [10]. Entropi ağırlığına dayalı kaya kütlesi sınıflandırması yapıldı [11]. Zagros tüneli-B İran için çeşitli kaya kütlesi sınıflandırma/karakterizasyon sistemleri arasındaki korelasyonlar incelendi [12]. Kaya kütlesi sınıflandırmada çeşitli optimizasyon algoritmaları da kullanıldı. Parçacık Sürü Optimizasyonu En Küçük Kareler destek vektörüne dayalı tünel çevreleyen kaya kütlesi için bir sınıflandırma yöntemi önerildi [13]. Tünel mühendisliğinde kaya sıkıştırma sınıflandırması için gri kurt optimizasyonuna dayalı geliştirilmiş olasılıksal sinir ağı algoritması kullanıldı [14]. Konvolüsyonel Sinir Ağı kullanarak mineral kayaç sınıflandırması yapıldı [15]. Önemli öngörücü değişkenleri tanıdıktan sonra kaya patlaması tahmini için akıllı sınıflandırma modelleri geliştirdi [16]. Fliş gibi tektonik olarak bozulmuş heterojen kaya kütlelerinin jeoteknik sınıflandırılması yapıldı [17]. Kaya sınıflandırması Maden ve hidrokarbon araştırmasında da önemli bir yere sahiptir. Maden ve hidrokarbon araştırması sondaj karotlarından çıkarılan jeolojik ve jeoteknik bilgilere dayanır. Geleneksel karot karakterizasyonu tamamen bir jeoloğun uzmanlığına bağlıdır. Yeni teknolojiler, tahribatsız bir şekilde otomatik mineral analizi yapabilir. Bununla birlikte, otomatik kaya kütlesi karakterizasyonu önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Bu bağlamda konvolüsyonel sinir ağları otomatik kaya kalitesi belirlemede kullanılmıştır [18]. Evrişimli sinir ağları kullanarak sondaj karot görüntülerinden otomatik litoloji sınıflandırması yapıldı [19], kaya geçirgenliğinin otomatik olarak sınıflandırılması için bir veri madenciliği yaklaşımı önerilmiştir. Yapılan çalışmada altı sınıflandırma algoritması (k-NN, NB, C4.5, RF, SMO ve MLP) kullanıldı ve kayaların geçirgenliğini dört farklı sınıfa ayırdı [20]. Yapay zeka algoritmaları ile plütonik kayaların otomatik sınıflandırılması [21] ve ömür yolunu çevreleyen kayaçların

duyarlık tahmini yapıldı [22]. Ayrıca granitik sert kaya akiferleri bulunan alanlarda yeraltı suyu potansiyeli haritalaması için geleneksel sınıflandırma modelleri kullanıldı [23]. Döner sondaj işleminde titreşim sinyali kullanarak andezit, granit, kireçtaşı ve beton sınıflandırıldı [24]. Bu çalışmada volkanitler arkoz kumtaşı ve kireçtaşlarının mekanik ve fiziksel özellikleri kullanılarak bulanık mantık algoritmaları ile bu kayalar sınıflandırıldı. Bu çalışmada kullanılan veri seti ve sınıflandırma algoritmaları 2. Bölümde açıklanmış, algoritmaların performans değerlendirilmesi 3. Bölümde yapılmış ve sonuçları sunulmuştur. 4. Bölümde sonuçlar yorumlanarak çalışma sonlandırılmıştır.

2. MATERYAL VE METHOD

Çalışma için Kocaeli bölgesindeki beş bölgeden kaya örnekleri toplanmış ve laboratuvar testleri yapılmıştır. Laboratuvar testleri ile 10 volkanik ve 86 sedimanter kayaç olmak üzere toplam 96 kaya örneğinin P dalgası hızı, kuru birim ağırlığı, tek eksenli basınç dayanımı, Nokta Yük İndeksi, Brezilya Çekme Dayanımı, gözeneklilik ve Schmidt Geri Tepme Sayısı belirlenmiştir [1]. Bu değerler sınıflandırma için kullanılmıştır. Veri setinin dengesiz olması nedeniyle Sentetik Azınlık Aşırı Örnekleme Tekniği (Smote) kullanılmıştır. Bu teknik, veri setinde veri sayısı az olan sınıfları, sayıca çok olan sınıflarla eşitleyen bir tekniktir. Düşük sayıya sahip sınıftaki verileri sınıf içinde bulunan komşu verilere göre rastgele çoğaltarak yapar. Böylelikle sınıf dengesizliği problemi çözülmüş olur [25]. Daha sonra algoritmaların bu tekniği uygulanmadan ve bu teknik uygulandıktan sonraki sınıflandırma performansları karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Veri setindeki sınıfların örnek sayıları

2.1. Bulanık Sırasız Kural İndüksiyon Algoritması (FURIA)

Bulanık kural tabanlı bir algoritmadır. FURIA, geleneksel kurallar yerine bulanık kuralları ve kural listeleri yerine sırasız kural kümelerini öğrenir. [26]. Bu sayede veri setlerinden bulanık mantık kurallarını üretebilir. Ayrıca etkili bir kural esnetme yöntemi kullanır. Bu algoritma bir kural çıkarım algoritması olan RIPPER algoritmasını genişletilmiş halidir.

2.2. Bulanık Kafes Akıl Yürütme (FLR)

Bulanık kafes akıl yürütme algoritması olarak tasarlanmıştır. Oluşturulan bir matematiksel kafes içinde karar kuralı üretir [27]. Algoritmanın öğrenme hızı yüksektir. Aşamalı öğrenme söz konusudur. Öğrendiği kurallara bağlı kalır. Algoritma ayrıca eksik verilerle başa çıkma yeteneğine sahiptir.

2.3. Çok Amaçlı Evrimsel Bulanık (MOE Fuzzy)

ENORA veya NSGA-II Çok Amaçlı Evrim Algoritmasını kullanarak bulanık kural tabanlı bir sınıflandırıcı oluşturur. Bu sınıflandırıcının amacı, en yüksek doğrulukta sınıflandırma yapabilmek için kural sayısını ve hata oranını en aza indirip her bir bulanık küme setine dilbilimsel etiketleme yaparak sınıflandırma yapmaktır [28]. Bu sınıflandırıcı, ENORA ve NSGA II algoritmalarına dayanmaktadır. NSGA-II ile ENORA algoritmaları birbirlerinden popülasyon içindeki elemanların sıralamasının hesaplama şeklidir. ENORA algoritmasında, popülasyon içindeki bir elemanın sırası, o elemanın bulunduğu kümede baskın olmayacak bir düzeyde tutulur. NSGA-II algoritmasında ise baskın olmayacak seviyeye getirilir.

3. PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Volkanitler, arkoz, kum taşı ve kireç taşı 4 farklı bulanık mantık algoritması kullanılarak sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma performanslarını karşılaştırmak için 10 kat çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. Eğitim ve 10 kat çapraz doğrulama yöntemi sonrasında elde edilen karışıklık matrisi Şekil 2'de verilmiştir.

		EĞİTİM				10-KAT ÇAPRAZ DOĞRULAMA					
		Tahmin edilen				Tahmin edilen					
		Volkanitler	Arkoz	Kumtaşı	Kireçtaşı		Volkanitler	Arkoz	Kumtaşı	Kireçtaşı	
FLR	Gerçek	Volkanitler	10	0	0	0	Volkanitler	9	0	0	1
		Arkoz	0	8	0	0	Arkoz	0	0	8	0
		Kumtaşı	0	0	56	0	Kumtaşı	1	0	55	0
		Kireçtaşı	0	0	17	5	Kireçtaşı	0	0	19	3
FURIA	Gerçek	Volkanitler	10	0	0	0	Volkanitler	9	0	0	1
		Arkoz	0	8	0	0	Arkoz	0	5	3	0
		Kumtaşı	0	0	53	3	Kumtaşı	1	0	52	3
		Kireçtaşı	0	1	3	18	Kireçtaşı	1	1	5	15
ENORA	Gerçek	Volkanitler	10	0	0	0	Volkanitler	9	0	0	1
		Arkoz	0	8	0	0	Arkoz	1	3	3	1
		Kumtaşı	1	2	45	8	Kumtaşı	1	0	47	8
		Kireçtaşı	2	0	6	14	Kireçtaşı	0	2	10	10
NSGA2	Gerçek	Volkanitler	0	0	0	10	Volkanitler	9	0	0	1
		Arkoz	0	8	0	0	Arkoz	0	4	4	0
		Kumtaşı	0	1	53	2	Kumtaşı	1	0	51	4
		Kireçtaşı	0	1	4	17	Kireçtaşı	2	0	10	10

Şekil 2. Eğitim ve çapraz doğrulama sonrası karmaşıklık matrisi

Şekil 2'ye göre bütün algoritmaların çapraz doğrulama yöntemi uygulandığında doğal olarak doğru tahmin ettikleri örnek sayısında bir azalma görülmektedir. Çapraz doğrulamada FURIA algoritması ile yapılan sınıflandırmada en yüksek doğru tahmin sayısına ulaşılmıştır. Algoritma bütün örneklerden sadece 15 tanesini yanlış sınıflandırmıştır. Algoritmaların eğitim ve çapraz doğrulama sonrası elde edilen metrik değerleri sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelgelerde her sınıfın Doğru pozitif (DP) oranı, Yanlış pozitif (YP) oranı, Kesinlik, Duyarlılık, F-Skoru, MCC, AUC ve Kappa değerleri bulunmaktadır. Bu metrik değerlerinin olması çok iyi bir sınıflandırmanın gerçekleştiğinden söz edilebilir. Tablolar incelendiğinde NSGA2 algoritmasında bazı metrik değerlerinin hesaplanamadığı görülmektedir. Buna karşın en yüksek metrik değerleri hem eğitimde hem de çapraz doğrulamada FURIA algoritması kullanıldığında hesaplanmıştır. Bu durum bu algoritmanın diğer algoritmalarından daha başarılı olduğu şeklinde yorumlanabilir. Sınıflandırmalarda en yüksek Kappa değeri eğitimde 0.87, doğrulamada ise 0.72 olarak hesaplanmıştır

Çizelge 1: Eğitim sonrası sınıflandırma ölçütleri

FLR								
Sınıf	DP Oranı	YP Oranı	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skoru	MCC	AUC	Kappa
Volkanitler	1	0	1	1	1	1	1	
Arkoz	1	0	1	1	1	1	1	
Kumtaşı	1	0.42	0.76	1	0.86	0.66	0.78	0.66
Kireçtaşı	0.27	0	1	0.22	0.37	0.43	0.61	
Ortalama	0.82	0.24	0.86	0.82	0.77	0.67	0.78	
FURIA								
Sınıf	DP Oranı	YP Oranı	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skoru	MCC	AUC	Kappa
Volkanitler	1	0	1	1	1	1	1	
Arkoz	1	0.1	0.88	1	0.94	0.93	1	
Kumtaşı	0.94	0.07	0.94	0.94	0.94	0.87	0.94	0.87
Kireçtaşı	0.81	0.04	0.85	0.81	0.83	0.79	0.91	
Ortalama	0.92	0.05	0.92	0.92	0.92	0.87	0.94	
ENORA								
Sınıf	DP Oranı	YP Oranı	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skoru	MCC	AUC	Kappa
Volkanitler	1	0.03	0.76	1	0.87	0.86	0.98	
Arkoz	1	0.02	0.8	1	0.88	0.88	.098	
Kumtaşı	0.80	0.15	0.88	0.80	0.84	0.64	0.82	0.67
Kireçtaşı	0.63	0.10	0.63	0.63	0.63	0.52	0.76	
Ortalama	0.80	0.11	0.80	0.80	0.80	0.66	0.84	
NSGA2								
Sınıf	DP Oranı	YP Oranı	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skoru	MCC	AUC	Kappa
Volkanitler	0	0	--	0	--	--	0.50	
Arkoz	1	0.02	0.80	1	0.88	0.88	0.98	
Kumtaşı	0.94	0.10	0.93	0.94	0.93	0.85	0.92	0.67
Kireçtaşı	0.77	0.16	0.58	0.77	0.66	0.55	0.80	
Ortalama	0.81	0.07	--	0.81	--	--	0.85	

Çizelge 2: 10-kat çapraz doğrulama sonrası sınıflandırma ölçütleri

FLR								
Sınıf	DP Oranı	YP Oranı	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skoru	MCC	AUC	Kappa
Volkanitler	0.9	0.01	0.9	0.9	0.9	0.88	0.94	0.37
Arkoz	0	0	--	0	--	--	0.50	
Kumtaşı	0.98	0.67	0.67	0.98	0.79	0.42	0.65	
Kireçtaşı	0.13	0.01	0.75	0.13	0.23	0.25	0.56	
Ortalama	0.69	0.39	--	0.69	--	--	0.65	
FURIA								
Sınıf	DP Oranı	YP Oranı	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skoru	MCC	AUC	Kappa
Volkanitler	0.9	0.02	0.81	0.90	0.85	0.84	0.99	0.72
Arkoz	0.62	0.01	0.83	0.62	0.71	0.70	0.86	
Kumtaşı	0.92	0.20	0.86	0.92	0.89	0.74	0.88	
Kireçtaşı	0.68	0.05	0.78	0.68	0.73	0.66	0.84	
Ortalama	0.84	0.13	0.84	0.84	0.83	0.73	0.88	
ENORA								
Sınıf	DP Oranı	YP Oranı	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skoru	MCC	AUC	Kappa
Volkanitler	0.9	0.02	0.81	0.90	0.85	0.84	0.93	0.50
Arkoz	0.37	0.02	0.60	0.37	0.46	0.43	0.67	
Kumtaşı	0.83	0.32	0.78	0.83	0.81	0.52	0.75	
Kireçtaşı	0.45	0.13	0.5	0.45	0.47	0.33	0.66	
Ortalama	0.71	0.22	0.70	0.71	0.71	0.50	0.74	
NSGA2								
Sınıf	DP Oranı	YP Oranı	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skoru	MCC	AUC	Kappa
Volkanitler	0.90	0.03	0.75	0.90	0.81	0.79	0.93	0.58
Arkoz	0.50	0	1	0.50	0.66	0.69	0.75	
Kumtaşı	0.91	0.35	0.78	0.91	0.84	0.59	0.78	
Kireçtaşı	0.45	0.06	0.66	0.45	0.54	0.44	0.69	
Ortalama	0.77	0.22	0.77	0.77	0.75	0.58	0.77	

Veri setindeki dengesizliği gidermek için yapılan Smoote işlemi sonrasında çapraz doğrulama yapılmış ve karışıklık matrisi Şekil 3'te diğer metrik değerleri ise Çizelge 3'te verilmiştir.

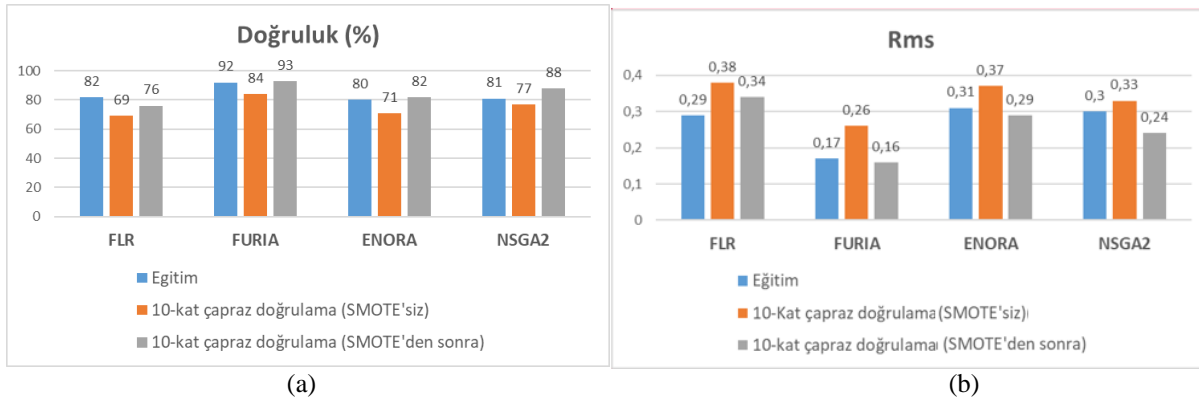
		FLR				FURIA					
		Tahmin edilen				Tahmin edilen					
FLR	Gerçek		Volkanitler	Arkoz	Kumtaşı	Kireçtaşı		Volkanitler	Arkoz	Kumtaşı	Kireçtaşı
		Volkanitler	60	0	0	0	Volkanitler	60	0	0	0
		Arkoz	0	35	21	0	Arkoz	0	56	0	0
		Kumtaşı	1	0	39	16	Kumtaşı	1	0	49	6
		Kireçtaşı	0	0	15	40	Kireçtaşı	0	1	6	48
		ENORA				NSGA2					
		Tahmin edilen				Tahmin edilen					
FURIA	Gerçek		Volkanitler	Arkoz	Kumtaşı	Kireçtaşı		Volkanitler	Arkoz	Kumtaşı	Kireçtaşı
		Volkanitler	60	0	0	0	Volkanitler	60	0	0	0
		Arkoz	0	56	0	0	Arkoz	0	54	2	0
		Kumtaşı	2	5	25	24	Kumtaşı	4	2	38	12
		Kireçtaşı	2	0	6	47	Kireçtaşı	2	1	4	48

Şekil 3.Smote ve Çapraz doğrulama sonrası karmaşıklık matrisi

Çizelge 3: Smote ve 10-kat çapraz doğrulama sonrası sınıflandırma metrikleri

.FLR								
Sınıf	DP Oranı	YP Oranı	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skoru	MCC	AUC	Kappa
Volkanitler	1	0	0.98	1	0.99	0.98	0.99	
Arkoz	0.62	0	1	0.62	0.76	0.74	0.81	
Kumtaşı	0.69	0.21	0.52	0.69	0.59	0.44	0.74	0.68
Kireçtaşı	0.72	0.09	0.71	0.72	0.72	0.63	0.81	
Ortalama	0.76	0.07	0.80	0.76	0.77	0.70	0.84	
FURIA								
Sınıf	TP Rate	FP Rate	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skoru	MCC	AUC	Kappa
Volkanitler	1	0	0.98	1	0.99	0.98	0.99	
Arkoz	1	0	0.98	1	0.99	0.98	1	
Kumtaşı	0.87	0.03	0.89	0.87	0.88	0.84	0.93	0.91
Kireçtaşı	0.87	0.03	0.88	0.87	0.88	0.84	0.94	
Ortalama	0.93	0.02	0.93	0.93	0.93	0.91	0.96	
ENORA								
Sınıf	TP Rate	FP Rate	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skoru	MCC	AUC	Kappa
Volkanitler	1	0.02	0.93	1	0.96	0.95	0.98	
Arkoz	1	0.02	0.91	1	0.95	0.94	0.98	
Kumtaşı	0.44	0.03	0.80	0.44	0.57	0.51	0.70	0.77
Kireçtaşı	0.85	0.14	0.66	0.85	0.74	0.66	0.85	
Ortalama	0.82	0.05	0.83	0.82	0.81	0.77	0.88	
NSGA2								
Sınıf	TP Rate	FP Rate	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skoru	MCC	AUC	Kappa
Volkanitler	1	0.03	0.90	1	0.95	0.93	0.98	
Arkoz	0.96	0.01	0.94	0.96	0.95	0.94	0.97	
Kumtaşı	0.67	0.03	0.86	0.67	0.76	0.70	0.82	0.84
Kireçtaşı	0.87	0.07	0.80	0.87	0.83	0.78	0.90	
Ortalama	0.88	0.03	0.88	0.88	0.87	0.84	0.92	

Sonuçlar incelendiğinde smote işleminin algoritmaların hesaplanan metrik değerlerini arttırdığı görülmektedir. Kappa değeri 0.91'e kadar yükselmiştir. Algoritmaların SMOTE işlemi öncesi ve sonrası elde edilen doğruluk ve hata değerleri Şekil 4'te verilmiştir.

**Şekil 4.** Algoritmaların a) doğruluk b) Rms değerleri

4. SONUÇLAR

Dört farklı bulanık mantık algoritması kullanılarak yapılan kaya sınıflandırmalarında genel olarak algoritmalar başarılı sonuçlar vermiştir. Algoritmaların sınıflandırma başarıları hem dengesiz veride hem de dengesizlik giderildikten sonra karşılaştırılmıştır. Algoritmaların dengeli verilerde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Algoritmalarından en başarılı olan algoritma FURIA algoritması olmuştur. Bu algoritma hem dengesiz veri setinde hem de dengeli veri seti kullanıldığında diğer algoritmalarından daha yüksek metrik değerlerine sahip olmuştur. Algoritma en yüksek doğruluk oranına sahip olmasının yanı sıra en az hata oranına ile bu sınıflandırmayı yapmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

E.E.: Yöntem, analiz, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

KAYNAKLAR

- [1] Kurtuluş, C., Sertçelik, F., Sertçelik, I. Correlating physico-mechanical properties of intact rocks with P-wave velocity. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 51, 571-582, 2016.
- [2] Ran, X., Xue, L., Zhang, Y., Liu, Z., Sang, X., He, J. Rock classification from field image patches analyzed using a deep convolutional neural network. *Mathematics*, 7(8), 755, 2019.
- [3] Su, C., Xu, S. J., Zhu, K. Y., & Zhang, X. C. Rock classification in petrographic thin section images based on concatenated convolutional neural networks. *Earth Science Informatics*, 13, 1477-1484, 2020.
- [4] dos Anjos, C. E., Avila, M. R., Vasconcelos, A. G., Pereira Neta, A. M., Medeiros, L. C., Evsukoff, A. G., .. & Landau, L. Deep learning for lithological classification of carbonate rock micro-CT, 2021.
- [5] Imamverdiyev, Y., & Sukhostat, L. Lithological facies classification using deep convolutional neural network. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 174, 216-228, 2019.
- [6] Chen, J., Yang, T., Zhang, D., Huang, H., & Tian, Y. Deep learning based classification of rock structure of tunnel face. *Geoscience Frontiers*, 12(1), 395-404, 2021.
- [7] Santos, A. E. M., Lana, M. S., & Pereira, T. M. Evaluation of machine learning methods for rock mass classification. *Neural Computing and Applications*, 34(6), 4633-4642, 2022.
- [8] Liu, Q., Wang, X., Huang, X., & Yin, X. Prediction model of rock mass class using classification and regression tree integrated AdaBoost algorithm based on TBM driving data. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 106, 103595, 2020.
- [9] Hasegawa, N., Hasegawa, S., Kitaoka, T., & Ohtsu, H. Applicability of neural network in rock classification of mountain tunnel. *Materials Transactions*, 60(5), 758-764, 2019.
- [10] Bertuzzi, R. Revisiting rock classification to estimate rock mass properties. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 494-510, 2019.

- [11] Dai, B., Li, D., Zhang, L., Liu, Y., Zhang, Z., & Chen, S. Rock Mass Classification Method Based on Entropy Weight–TOPSIS–Grey Correlation Analysis. *Sustainability*, 14(17), 10500, 2022.
- [12] Sadeghi, S., Sharifi Teshnizi, E., & Ghoreishi, B. Correlations between various rock mass classification/characterization systems for the Zagros tunnel-W Iran. *Journal of Mountain Science*, 17(7), 1790-1806, 2020.
- [13] Lu, J., Guo, W., Liu, J., Zhao, R., Ding, Y., Shi, S. An Intelligent Advanced Classification Method for Tunnel-Surrounding Rock Mass Based on the Particle Swarm Optimization Least Squares Support Vector Machine. *Applied Sciences*, 13(4), 2068, 2023.
- [14] Huang, X., Yin, X., Liu, B., Ding, Z., Zhang, C., Jing, B., & Guo, X. A gray wolf optimization-based improved probabilistic neural network algorithm for surrounding rock squeezing classification in tunnel engineering. *Frontiers in Earth Science*, 10, 857463, 2022.
- [15] Amiripallia, S. S., Rao, G. N., Beharaa, J., Sanjay, K. *Mineral Rock Classification Using Convolutional Neural Network*. Recent Trends in Intensive Computing; IOS Press: Amsterdam, The Netherlands, 2021.
- [16] Afraei, S., Shahriar, K., & Madani, S. H. Developing intelligent classification models for rock burst prediction after recognizing significant predictor variables, Section 1: Literature review and data preprocessing procedure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 324-353, 2019.
- [17] Marinos, V. A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 899-912, 2019.
- [18] Alzubaidi, F., Mostaghimi, P., Si, G., Swietojanski, P., & Armstrong, R. T. Automated rock quality designation using convolutional neural networks. *Rock mechanics and rock engineering*, 55(6), 3719-3734, 2022.
- [19] Alzubaidi, F., Mostaghimi, P., Swietojanski, P., Clark, S. R., & Armstrong, R. T. Automated lithology classification from drill core images using convolutional neural networks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 197, 107933, 2021.
- [20] de Freitas, K. L. F., da Silva, P. N., Faria, B. M., Gonçalves, E. C., Rios, E. H., Nobre-Lopes, J., ... & de Vasconcelos Azeredo, R. B. A data mining approach for automatic classification of rock permeability. *Journal of Applied Geophysics*, 196, 104514, 2022.
- [21] Alférez, G. H., Vázquez, E. L., Ardila, A. M. M., & Clausen, B. L. Automatic classification of plutonic rocks with deep learning. *Applied Computing and Geosciences*, 10, 100061, 2021.
- [22] Deng, G., & Fu, Y. Fuzzy rule based classification method of surrounding rock stability of coal roadway using artificial intelligence algorithm. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(4), 8163-8171, 2021.
- [23] Taheri, F., Jafari, H., Rezaei, M., & Bagheri, R. The use of continuous fuzzy and traditional classification models for groundwater potentiality mapping in areas underlain by granitic hard-rock aquifers. *Environmental Earth Sciences*, 79, 1-16, 2020.
- [24] Stehliková, B., Bogdanovská, G., Flegner, P., Frančáková, R., & Drančák, L. *Rock Classification Using a Vibration Signal in the Process of Rotary Drilling*, 2023.
- [25] Chawla, N. vd. SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16, 321-357, 2002.
- [26] Hühn, J., Hüllermeier, E. FURIA: an algorithm for unordered fuzzy rule induction. *Data Mining and Knowledge Discovery*, Volume 19, Issue 3, p. 293–319, 2009.
- [27] V. G. Kaburlasos, I. N. Athanasiadis, P. A. Mitkas . Fuzzy Lattice Reasoning (FLR) Classifier and its Application for Ambient Ozone Estimation. *International Journal of Approximate Reasoning*, Volume 45, Issue 1, May 2007,152-188, 2003.
- [28] Jimenez, F., Sanchez, G. & Juarez, J.M. Multi-objective Evolutionary Algorithms for Fuzzy Classification in Survival Prediction. *Artificial Intelligence in Medicine*, 60(3), 197-219, 2014.

Mevcut Binalarda Enerji Verimli Yenileme ve EKB Uygulaması

Esma Mihlayanlar¹, Sinan Meral²

¹Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Trakya Üniversitesi, Edirne, Türkiye
²Mimarlık Ofisi Çerkezköy, Türkiye

Geliş: 22.10.2023, Kabul: 27.12.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

ÖZ

Küresel iklim değişikliği; yangınlar, kuraklık, seller, deniz seviyesindeki değişiklikler vb. şeklinde yer kürenin farklı noktalarında etkilerini göstermektedir. Bununla birlikte yaşanan doğal afetler, enerji tüketimi, kaynakların ve biyolojik çeşitliliğin azalması gibi küresel çevre sorunları giderek artmaktadır. Çevresel etkiler üzerinde önemli bir yeri olan binalar toplam enerji tüketiminin %40'ı ve sera gazı emisyonlarının 3/1 inden sorumludur. Bu nedenle binalarda enerji verimliliği küresel ölçekteki önemini korumaktadır. Binaların enerji tüketimini ve sera gazı salınımlarını azaltma konusundaki etkisi açısından ülkeler çalışmalarını yoğunlaştırmaktadır.

Binalarda enerji verimliliği; yaşam standardı ve hizmet kalitesinden ödün vermeden enerji tüketiminin azaltılması olarak tanımlanmaktadır. Enerji verimliliği yüksek binaların sahip olması gereken ilk özellik, binanın bulunduğu coğrafi özelliklere göre yönlendirilmesi, güneşten kışın maksimum kazanç sağlayacak yazın da korunacak şekilde biyoklimatik ve pasif tasarım ilkelerine göre tasarlanmasıdır. Bununla birlikte bina kabuğunda ısı kayıplarını azaltacak ve yeterli ısı direnci sağlayacak önlemler alınmalıdır. Enerji verimli binalar aynı zamanda kullanıcılarının sağlık, üretkenlik ve konfor şartlarını sağlayabilmektedir.

Toplam bina stoku içerisinde önemli bir yere sahip olan mevcut binaların enerji verimli yenilenmesinin önemi, aşamaları, uygulamaları bu çalışmanın ana amacını oluşturmaktadır. Çalışmada Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği kapsamında geliştirilen BEP-TR2 hesap yöntemi kullanılarak mevcut iki katlı bir konut örneğinde uygulanacak farklı yenileme (renovasyon) senaryoları sonuçlarının yıllık enerji tüketimleri, sera gazı emisyonları ve enerji sınıfları açısından karşılaştırılması hedeflenmiştir. Farklı iyileştirme seçeneklerinde yıllık enerji tüketiminde, sera gazı emisyonunda ve kg eşd CO₂/m²yıl miktarında değişen oranlarda düşüş görülmektedir. Bu düşüş aynı zamanda binanın enerji performans sınıfının iyileşmesini sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Enerji verimliliği; Enerji verimli yenileme; Enerji kimlik belgesi; BEP-TR

Energy Efficiency Renovation and EKB Application in Existing Buildings

ABSTRACT

Global climate change exhibits its effects in various parts of the world, such as wildfires, droughts, floods, sea level changes, and more. Furthermore, global environmental issues like natural disasters, energy consumption, depletion of resources, and biodiversity loss are increasing. Buildings play a crucial role in these environmental consequences, responsible for 40% of total energy consumption and one-third of greenhouse gas emissions. Thus, the need to construct energy efficient buildings on a global scale is evident. Countries enhance their efforts to minimize energy consumption and greenhouse gas emissions in buildings.

Energy efficiency in buildings is defined as minimizing the energy consumption with maintaining living standards. In the pursuit of high-energy efficient buildings, it is necessary to design based on bioclimatic and passive design principles. This design should consider the geographical location to maximize solar gain in winter and provide effective thermal insulation in summer. Furthermore, efforts to decrease the heat loss through the building envelope and guarantee adequate thermal resistance are essential. Energy-efficient buildings can also increase the well-being, productivity, and comfort of their occupants.

This study primarily aims to reveal the significance, various stages, and applications of making existing buildings which plays a significant role in the overall building stock more energy-efficient. This study intends to utilize the BEP-TR2 calculation method, developed under the Building Energy Performance Regulation, to compare the results of various renovation scenarios in an existing two-story residential building. The comparison will evaluate their annual energy consumption, greenhouse gas emissions, and energy efficiency ratings. Various renovation options yield different levels of reduction in yearly energy use, greenhouse gas emissions, and kg-eq CO₂/m²year. These reductions also contribute to enhancing the building's energy performance rating.

Keywords: Energy efficiency; Energy efficient renovation; Energy identity certificate; BEP-TR

1. GİRİŞ

İklim değışikliği ve çevresel etkileri küresel endişeleri de zamanla artırmıştır. Oluşan çevresel etkiler global ölçekte ülkeleri farklı platformlar altında iklim değışikliği ile ilgili önlemler alıp bunları uygulamaya koyma yolunda bir araya getirmiştir. 1970’li yıllarda başlayan bu çalışmalar belli aralıklarla sözleşmeler, konferanslar, protokoller, anlaşmalar şeklinde sürmektedir. Bu çalışmalar; Viyana sözleşmesi (1985) [1], Montreal Protokolü (1987) [2], Rio Konferansı (1992) Kyoto Protokolü (1997) [3], Taraflar Konferansı / COP1 (1995) ile başlayıp COP 27 (2022)’a kadar devam etmiştir [4]. Özellikle 2015 yılındaki Paris Anlaşması, ortalama küresel sıcaklık artışının sanayi öncesi döneme göre 2 derecenin altında 1.5 derece seviyesinde tutulması için, ülkeleri bu anlamda ciddi önlemler almaya şart koşturmuştur [5,6]. Bununla birlikte süreç içerisinde ODP (Ozone Depletion Potential/Ozon Azaltma Potansiyeli), GWP (Global Warming Potential/Küresel Isınma Potansiyeli), GHG (Green Houses Gases/Sera Gazları) arttırıcı eylemlerin sınırlandırılmasına gidilmiştir [7].

Dünya genelinde enerji tüketimi 1990’lı yıllara göre artış göstermektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre 2022 yılında yaklaşık 15.000 milyar TON eşdeğer petrolük seviyeye yükselmiştir. Küresel enerji talebini karşılamak üzere; %30 petrol, %27 kömür, %23 doğal gaz vb fosil kökenli kaynaklar kullanılmaktadır. Türkiye de enerji tüketimi 1990 da 52 milyon ton eşdeğer petrolken 2022 de 156 milyon ton eşdeğer petrole yükselmiştir. Kullanılan enerji kaynağı yine yaklaşık olarak %82’nin üzerinde fosil kaynaklıdır [8].

Ülkelere göre enerji tüketimi kültür, iklim ve refah açısından farklılıklar göstermektedir. Gelişmiş ülkeler enerji verimliliğiyle ilgili olarak yeni teknolojiler, malzemeler ve uygulamalar doğrultusunda yol haritaları belirlemekte ve enerji tüketimini azaltıcı hedefler koymaktadır. Ana hedef çevrenin korunması ve emisyonların azaltılmasının yanında enerji verimliliğinin de sağlanmasıdır.

Mevcut binalar ve yapı sektörü, küresel enerji tüketiminin %40 ile emisyonların üçte birinden sorumludur [9]. Birçok ülkede yaşanan binaların zayıf enerji performansı, söz konusu emisyonlara büyük katkı sağlamaktadır [10]. Var olan eski bina stoku yeni enerji verimliliği gerekliliklerini sağlayamadığından fazla enerji tüketerek daha fazla emisyon yaymaktadır [11,12,13] Bu nedenle, küresel enerji kullanımının zamanında azaltılması ve çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi için mevcut binalarda enerji verimliliğinin hızla arttırılması büyük önem taşımaktadır [14,15]. Mevcut binaların enerji verimli yenilenmesiyle ilgili literatürde farklı ülkelerde pek çok çalışma yürütülmektedir. Farklı bina tipoloji üzerinde mevcut binalarda enerji verimli yenilemede; karar verme süreçleri, yenileme stratejileri, politikalar ve yenilemenin önündeki zorluklar araştırmacıların gündemini oluşturmaktadır [10, 15 - 20].

Binalarda tüketilen enerji; ısıtma, soğutma, aydınlatma, havalandırma, sıcak su vb. ihtiyaçları karşılamak üzere harcanmaktadır. Binaların özellikleri ve inşa edildikleri yere göre enerji ihtiyaçları değişmektedir. Soğuk iklim bölgelerindeki binalarda ısıtma, sıcak iklim bölgelerinde ise soğutma ihtiyacı için enerji daha çok kullanılmaktadır. Genel olarak enerji tüketiminin büyük bir bölümü iklimsel konforun sağlanmasında harcanmaktadır. Binaların enerji tüketimleri açısından sınıflandırılmalarında bu tüketimleri dikkate alınmaktadır. Günümüzde hedef sıfır enerjili–kendi kendine yetebilen binalar üretmektir. Bu bina tasarımları artan enerji talebini karşılamak için yeterli enerjiyi üretebilen yenilenebilir enerji tedarik sistemlerine sahip bina yaklaşımıdır [21].

Yüksek enerji tüketimlerine rağmen bina sektörü, diğer sektörlerle göre enerji ve emisyon tasarrufları bakımından en yüksek potansiyele sahiptir. Bina sektörü, düşük maliyetli enerji tasarrufu potansiyeli çok yüksek olduğu için, enerji verimliliğinde öncelikli alan haline gelmiştir. Dünyanın her yerinde enerji verimliliğinin en gözde uygulama alanı binalar olmuştur. Aynı zamanda enerji tüketen ekipman ve altyapının ekonomik ömürlerine baktığımızda binaların ekonomik ömürleri asgari olarak 40 yıl kabul edilmesine rağmen potansiyel ömürleri asgari ömürlerinin çok daha üstüne çıkabilmektedir. Binalar bu anlamda iyi ve uzun vadeli yatırımlar olarak görülmektedir. Artan bina stokuna karşı enerji tüketiminin ve olumsuz çevresel etkilerin azaltılmasında bina enerji verimliliği ön plana çıkmaktadır [22].

Küresel ölçekte bu konuda çalışmalar devam ederken Avrupa Birliği (AB) Konseyi, 2019-2024 Stratejik Gündeminde *“Herkes İçin Temiz Bir Gezegen”* stratejik vizyonunu sunarak bu kapsamda; iklim açısından nötr, yeşil, adil ve sosyal bir Avrupa kıtası inşa etmeyi hedeflemiştir. Konsey 12 Aralık 2019 tarihinde açıkladığı *“Yeşil Mutabakat”* ile karbon nötr bir AB'ye ulaşmak için belirlenen hedefleri yasal hale getirmiştir. AB Konseyi 2030'a kadar sera gazı emisyonlarını, 1990 yılındaki meydana gelmiş olan emisyon miktarından %55 daha düşürmeyi hedeflemektedir [23].

Enerji tüketiminde önemli bir etkisi olan binalar açısından, AB Konseyine üye ülkelerde, Binalarda Enerji Performans Direktifi (EPBD) 2002 yılında yürürlüğe girmiştir. 2010 ve 2018 yıllarında, tadil edilen (2002/2010/2018) Binalarda Enerji Performans Direktifi; hem yeni hem de mevcut binalar için geçerli olan, ticari ve konut tipi bina türlerini de kapsayan performansa dayalı bir araçtır. Buna göre 31 Aralık 2020'den itibaren yeni binalar *“Yaklaşık/Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar / (Nearly/Zero Energy Buildings (nZEB))”* olarak üretilecektir. AB yol haritasında 2050 yılına kadar sera gazları emisyonunda 1990 seviyesine göre %80/85 oranında azaltma ve karbonsuzlaşma hedeflenmektedir. Yaklaşık/Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar: *“Enerji ihtiyacı çok düşük, enerji performansı çok yüksek ve gerekli enerji miktarının çoğunlukla yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılandığı bina”* olarak tanımlanmaktadır [24].

Yeni yapılacak binaların yaklaşık sıfır enerji hedefleriyle yapılmasının yanında Direktif (2012/27/EU) kamu binalarında toplam zemin alanının en az %3'ünde her yıl enerji verimli iyileştirme yapmasını ve mevcut binaların da enerji verimli hale getirilmesini istemektedir [25]. Bu anlamda mevcut binaların yenilenmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve çevresel etkinin azaltılması açısından oldukça önemlidir [26].

Küresel oranlara benzer olarak Türkiye’de nihai enerji tüketiminin üçte biri binalar için harcanmaktadır [27]. Türkiye’de enerji verimliliği çalışmaları 1970’li yıllarda başlamış özellikle ısı korunumu konusunda yasa ve yönetmelikler yürürlüğe girmiştir. 1985 yılında Isı Korunumu Yönetmeliği (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı-1985), TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı (1998, 2005, 2008, 2013), TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Yönetmelikleri (2000, 2008) ısıtma enerjisinin sınırlandırılması ve hesaplanması üzerinedir. Öncelikli olarak ısıtma ihtiyacının azaltılması hedeflenmekte ve bu ihtiyacın belirlenmesinde TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı kullanılmaktadır. Ayrıca 2007 yılında çıkan 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunuyla enerjinin etkin kullanılması, israfın önlenmesi, enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki yükünün hafifletilmesi amaçlanmaktadır [28]. Binalarda Enerji Performans (BEP) Yönetmeliği 2008 yılında Resmi Gazete de yayımlanarak, 2009 yılında yürürlüğe girmiştir (2008, 2010,2011, 2017, 2022). Yönetmeliğinin amacı; binalarda enerjinin ve enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanılmasını, enerji israfının önlenmesini ve çevrenin korunmasına ilişkin usul ve esasları düzenlemektir [29]. BEP ile binaların ısıtma, soğutma, aydınlatma ve havalandırmayı da içine alan toplam enerji tüketimi belirlenmektedir. BEP-TR hesap yöntemi ile belirlenen yıllık toplam enerji tüketimine bağlı olarak “*Enerji Kimlik Belgesi/EKB*” hazırlanması zorunluluğu da getirilmiştir. Ayrıca Enerji Verimliliği Strateji Belgesi (2012-2023) [30], Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017-2023) [31], Binalar ve Yerleşmeler için Yeşil Sertifika Yönetmeliği (2017-2022) (YES-TR) [32,33] ile bu düzenlemeler desteklenmektedir.

Binaların enerji tüketim oranlarının belirlenmesine yönelik olarak çoğu ülkede zorunlu Enerji Performans Sertifikaları düzenlenmektedir. Enerji tüketen ekipmanlar için yıllardır kullanılan bu yöntem binalara da uygulanmaktadır. Yüksek enerji performansından düşük enerji performansına doğru değişen enerji kodları, binaların enerji tüketimlerini ifade etmektedir. Toplam bina stoku içindeki mevcut binaların sayısının ve enerji tüketimlerinin yeni binalardan daha yüksek olduğu bilinmektedir [10-13]. Türkiye’de binalar büyük miktarda enerji tüketiminden sorumludur ve yüksek enerji tasarrufu potansiyeline sahiptir [34]. Bu çalışmada mevcut iki katlı bir konut örneğinde, Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği kapsamında geliştirilen BEP-TR2 hesap yöntemi kullanılarak uygulanacak farklı yenileme (renovasyon) senaryoları ile yıllık enerji tüketimleri, sera gazı emisyonları ve enerji sınıfları sonuçları karşılaştırılmaktadır.

2. BİNALARDA ENERJİ PERFORMANS YÖNETMELİĞİ VE EKB

Türkiye’de binaların toplam enerji tüketiminin belirlenmesinde Enerji Performans Yönetmeliği kapsamında 2011 yılından bu yana Binalarda Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi (BEP-HY) kullanılmaktadır. Çevre Şehircilik ve iklim Değişikliği Bakanlığı sunucuları üzerinden web tabanlı erişim sağlanan Bina Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi Türkiye (BEP-TR), ile bina enerji performansı hesabı yapılabilmekte ve binaların Enerji Kimlik Belgeleri (EKB) üretilebilmektedir. BEP-TR hesap yöntemi ile binaların ısıtma, soğutma, havalandırma, aydınlatma ve sıcak su temini için tükettikleri enerji, karbondioksit (CO₂)/sera gazı salınım ve enerji sınıfları belirlenerek EKB belgesi verilmektedir [35]. Binanın enerji tüketim ve sera gazı salınım sınıfları en yüksek performanstan “A,B,C,D,E,F,G” ye doğru azalan renk kodlarıyla, yenilenebilir enerji potansiyeli kullanımı da söz konusu ise; hesaplama dahil edilerek, kullanım oranı yüzde (%) ifadesi ile belge üzerinde belirtilmektedir [36].

Ulusal hesap metodu BEP-TR programı EN ISO 13790:2008 (Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling) standardına göre geliştirilmiştir. BEP-TR; standardın binaların ısıtılması ve soğutulması için binanın ihtiyacı olan net enerji miktarının belirlenmesinde önerdiği üç yöntemden biri olan, yarı dinamik basit saatlik hesaplama metodu prensibi ile hesap yapmaktadır [37]. EN ISO 13790:2008 Standardı 2017 yılında EN ISO 52016-1 olarak revize edilmiştir [38].

Yönetmelik çerçevesinde oluşturulan BEP-TR yazılım programının ilk versiyonu (BEP-TR1) 2011 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu dönemde programın işleyişindeki aksaklıklar ve EKB’nin alınması konusunda çeşitli problemlerle karşılaşmıştır. Yaşanılan problemlerin giderilmesi için yapılan çalışmalardan sonra bu aksaklıklar giderilerek, BEP-TR2 yazılımı oluşturulmuştur. BEP-TR1 olarak adlandırılan eski program 1 Kasım 2017 tarihinden itibaren yürürlükten kaldırılmıştır [39]. 2017 yılı itibarıyla BEP-TR2 kullanılmaktadır.

BEP-TR yazılımına göre, Enerji Kimlik Belgesi alacak olan 01.01.2011 tarihinden sonra yapı ruhsatı alan, yeni binalar en az “C” sınıfı enerji tüketimine ve karbondioksit salımına sahip olmak zorundadır. Enerji Kimlik Belgesi, düzenleme tarihinden itibaren 10 yıl süre ile geçerlidir. Enerji Kimlik Belgesinin, binanın tamamı için hazırlanması şarttır. Enerji Kimlik Belgesi düzenlenmeyen binalara ilgili idarelerce yapı kullanma izin belgesi verilmez. Mevcut binalar için belirlenmiş bir sınıf yoktur ve 01.01.2011 tarihinden önce yapı ruhsatı alan mevcut binalara zorunlu EKB düzenlenmesi uygulaması 2 Mayıs 2017 tarihi itibarıyla başlamıştır. Ancak binalar veya bağımsız bölümlere ilişkin alım, satım ve kiraya verme ile ilgili iş ve işlemlerde Enerji Kimlik Belgesinin aranması şartı 01.01.2020 tarihinde uygulanmaya başlamıştır. Sanayi alanlarında üretim faaliyetleri yürütülen, kullanım süresi iki yıldan az olan, toplam kullanım alanı 50 m²’nin

altında olan binalar, tarımsal binalar, seralar, atölyeler, münferit olarak inşa edilen ve ısıtılmasına ve soğutulmasına gerek duyulmayan depo, cephanelik, ardiye, ahır, ağıl gibi binalar yönetmelik kapsamı dışındadır. Bu binalar için EKB düzenlenmesi zorunlu değildir [36].

2009 yılında yürürlüğe giren Enerji Performans Yönetmeliği ile birlikte Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği yürürlükten kaldırılmıştır. Süreç içerisinde yönetmelikte çeşitli güncellemeler yapılmaktadır. 19.02.2022 tarihinde yapılan değişiklik ile Binalarda Enerji Performans Yönetmeliğine göre normal binalardan “Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar” konseptine geçişin aşamalı olarak zorunlu hale getirildiği 01.01.2023 tarihli 5.000 m² den büyük olan tüm binaların enerji performans sınıfının “B” sınıfı olması ve kullandığı enerjinin en az %5 inin yenilenebilir enerji kaynakları (fotovoltaik panel, rüzgar türbünü, ısı pompası vb) sağlanmasının zorunlu olduğu ve bu doğrultuda binaların mimari, mekanik ve aydınlatma projelerinin BEP yönetmeliğine uygunluğunu gösteren ön hesap sonucu ruhsat eki ile birlikte Belediye’ye sunulması gerekmektedir. 2022 yılında ön onay almış olsa dahi 01.01.2023 tarihinden sonra alınacak yeni yapı ruhsatları için BEP yönetmeliği hükümleri doğrultusunda gerekli işlemlerin yapılmasını zorunlu kılmaktadır [40]. Ayrıca 2025 yılı itibariyle 2000 m² inşaat alanı üzerindeki binaların en az "B" sınıfı veya daha yüksek bir EKB'ye sahip olması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının binanın toplam birincil enerji tüketiminin en az % 10'unu sağlaması gerekmektedir [41]. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğüne göre EKB uygulamasının başladığı 2011 yılından itibaren 2023 Eylül ayına kadar EKB belgesi almış bina sayısı 1.519.339'dur. EKB alan binalar içinde yenilenebilir enerji kullanım oranı % 8.35 dir. EKB alan toplam bina sayısı içindeki yeni bina sayısı 1.172.050, eski bina sayısı 347.319'dur. Bu sayıya A dan G ye tüm belge alan binalar dahildir. Tüm sınıflardaki EKB sayısı dağılımı Çizelge 1 de verilmektedir. D, E, F, G sınıflarını içine alan mevcut binalarda toplam EKB sayısı 116.718 dir [42]. Ancak D-G sınıfları arasında EKB alan mevcut binaların yeni binalara oranla yüksek enerji tüketimi olduğu aşikardır.

Çizelge 1:Türkiye’de 2011 yılında Eylül 2023’e kadar EKB almış bina sayısı ve sınıfları [42]

EKB sınıfı	Bina sayısı
A	3.740
B	359.412
C	1.039.472
D	77.208
E	26.990
F	10.488
G	2.032
EKB alan toplam bina sayısı	1.519.339

Literatürde ulusal BEP-TR programı kullanılarak çeşitli binalarda ısıtma, soğutma, aydınlatma, havalandırma enerji ihtiyaçlarının hesaplandığı çalışmalar yer almaktadır [37, 43- 49].

2.1. Binalarda Enerji Verimli Yenileme

Enerji verimliliği, binalarda kullanıcı yaşam konforu ve hizmet kalitesinin, sanayi işletmelerinde ise üretimin kalitesi ve nicelik düşüşüne yol açmadan, birim veya ürün miktarı başına enerji kullanımının azaltılmasıdır. Enerji verimliliği stratejileri, ekonomik ve sosyal büyüme ile sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle doğrudan ilişkili olmasının yanında toplam sera gazı emisyonlarının azaltılmasında da önemli rol oynamaktadır [50].

Binalarda yapay ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma ihtiyaçları toplam bina enerji tüketiminin % 40 - % 70'ini karşılamakta ve enerji tasarruflu önlemlerle ısıtma ve soğutma enerjisinde yaklaşık % 60, aydınlatma enerjisinde ise % 50 oranında enerji tasarrufu sağlanabilmektedir [51].

Binalar az katlı veya çok katlı olarak farklı fonksiyonlara hizmet etmek için planlanıp inşa edilirler. Bina kabuğunda enerji kayıpları ve kazançları saydam ve opak yapı elemanlardan gerçekleşir. Bu açıdan yapı elemanlarının termofiziksel ve optik özellikleri önemlidir. Isı kayıp ve kazançlarının büyük bir kısmı yapı kabuğundan olurken kayıp ve kazançların kalan bir kısmı da yapının yönlendiği, havalandırma ve hava kaçaklarıyla ilişkilidir.

Bina enerji performansı üzerinde tasarım parametreleri [35] ile bina kabuğunun doğru planlanması ve uygulanması önemli rol oynamaktadır. İklim verileri, konum, yönelim, form, engel durumu, bina kabuğu, kazançlar, doğal havalandırma, aktif ısıtma sistemleri, aktif soğutma sistemleri, aktif havalandırma sistemleri, aydınlatma sistemleri, sıcak su sistemleri, yenilenebilir enerji sistemleri bina enerji performansını belirlemektedir [24]. Bu stratejiler aynı zamanda bina kullanıcılarının sağlık, üretkenlik ve konfor şartlarını da etkilemektedir. Çizelge 2'de tasarım parametreleri ve bina kabuğu kesitinin enerji verimli bina ve kullanıcı konforu üzerindeki etkileri özetlenmektedir.

Çizelge 2: Enerji verimli bina ve kullanıcısı için sağlık, üretkenlik, konfor sağlanmasında tasarım parametreleri ve bina kabuğu özellikleri

<i>Tasarım parametreleri</i>	<i>Bina kabuğu kesitinin doğru tasarlanması ve uygulanması</i>
<ul style="list-style-type: none">- Biyoklimatik, pasif tasarım- Binada ısı kayıplarının azaltılması<ul style="list-style-type: none">- Hava sızdırmazlık- Havalandırma- Ekipman, Cihazlar- Yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı	<ul style="list-style-type: none">- Yeterli ısı direnci- Yeterli ısı kütle- Kontrollü ve yeterli havalandırma- Kesitte yoğunlaşma meydana gelmemesi

Mevcut bir binada enerji verimli yenileme literatürde genel olarak enerji etkin iyileştirme, güçlendirme, verimlilik tadilatı gibi terimlerle kullanılmaktadır [15, 52 - 56]. Enerji verimli yenilemede binanın mevcut durumu iyi analiz edilmeli bunun için yerinde inceleme, gözlem ve hesaplamalar yapılmalıdır. Bina enerji etkinliğini arttıracak önlemler hayata geçirilmeden analiz edilerek bu önlemlerin uygun kombinasyonları ile oluşturulan iyileştirme paketlerinin belirlenip, sınanması ve önerilerin etkinliklerinin karşılaştırılması yapılarak uygun tedbirlere dair karar verilebilmektedir [57]. Sürdürülebilirlik, yaşam döngüsü, maliyet etkinlik açılarından yapılan analizler sonrasında seçim yapılmalıdır [24, 58, 59]. Sağlam binaların enerji verimli hale getirilmesi için bina tipolojisi, iklimi ve kabuk özellikleri mekanik ve aydınlatma ile yenilenebilir enerji katkısının bütünleşik bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir [57,59].

Enerji verimli yenileme uygulanacak olan iyileştirme aşamalarına göre, genel olarak “*Temel-Küçük (Minor)*”, “*Orta (Moderate-Medium)*”, “*Büyük-Derin (Deep)*” iyileştirme [60, 61] veya çok büyük “*Kapsamlı (Yaklaşık Sıfır Enerjili Bina Renovasyonu)*” [62] şeklinde uygulanabilmektedir.

Yapılan ön inceleme ve fizibilite çalışmaları sonrasında enerji verimli yenilemenin hangi sistemlerde uygulanacağına ve aşamalarına karar verilmelidir. Enerji verimli yenilemede bina kabuğunda uygulanacak iyileştirme çalışmaları, ısıtma, soğutma, aydınlatma ve güç sistemlerinin verimli hale getirilmesiyle yenilenebilir enerji kaynakları binaya entegre edilebilmektedir. Bina enerji tüketiminde etkisi olan yenileme önerileri Çizelge 3 de gibi özetlenebilir[62].

Çizelge 3: Bina enerji verimliliğini arttıracak yenileme seçenekleri

<i>Yenileme Önerileri</i>	<i>Uygulamalar</i>
<i>Bina kabuğunda</i>	Yapı elemanlarında yalıtım, yüksek termal performanslı cam ve doğrama sistemleri, pencere-duvar oranının uygun olması, dış gölgeleme araçları kullanımı
<i>Isıtma, soğutma, sıcak su sistemlerinde</i>	Kazan, boiler vb elemanların yenilenmesi, kazan atık ve ısı geri kazanımı sistemleri kullanılması, kojenerasyon, trijenerasyon sistemlerin kullanımı, ısıtma soğutma çevrimlerinde termostatik vanaların kullanımı, düşük debili duş başlıkları, lavabolar için düşük debili musluklar ve iki sifon ayarlı klozetler, bina otomasyon ve enerji izleme sistemleri kullanımı
<i>Aydınlatma sistemlerinde</i>	Enerji tasarruflu aydınlatma sistemi ve armatürleri (LED, kompakt flouresan), hareket sensörlü armatür kullanımı
<i>Güç sistemlerinde</i>	Pompa ve fanlar, vb kullanımı
<i>Yenilenebilir enerji sistemleriyle</i>	Rüzgar, güneş vb yenilenebilir kaynaklar binaya entegre ederek enerji ihtiyacını karşılamak, jeotermal ısı pompaları, vb kullanımı

Bina kabuğunda alınacak önlemlerin başında yapı elemanlarındaki ısıl kayıplarının engellenmesi gelmektedir. Binalarda enerji kayıplarının değerlendirilmesinde önemli bir gösterge; elemanların ısıl geçirgenliği ve ısıl direncidir. Enerji verimli bir binada elemanın ısıl geçirgenliğinin küçük, ısıl direncinin de yüksek olması gerekmektedir. Bu; yapı elemanında ısı iletimini yavaşlatacak mekanizmaların veya

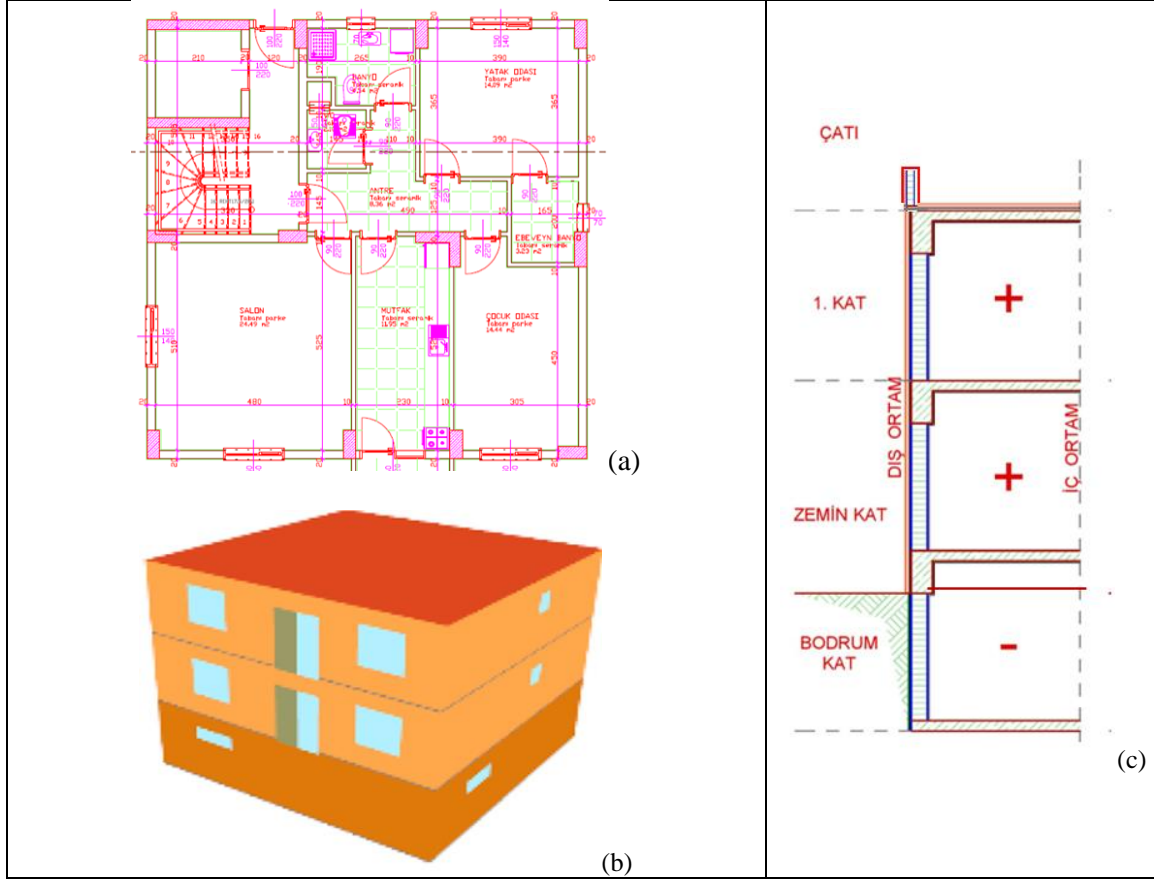
katmanların kullanılması ile mümkün olmaktadır. Opak elemanlarda yalıtım malzemelerinin kullanımı ve yalıtım kalınlıklarının artırılması ile kayıplar azaltılmaktadır. Saydam elemanlarda ise cam katmanlarının sayısına, katmanlar arasındaki boşluğa ve boşluk içinde bulunan gazın özelliğine göre ısı geçirgenlik değişmektedir. Enerji verimli yenileme aşamalarına; opak elemanlarda yalıtım kalınlıkları artırılarak, saydam elemanlarda doğrama ve cam özellikleri değiştirilerek yapılmaktadır. Isıtma, soğutma, sıcak su ve aydınlatma ve güç sistemlerinde eski elemanlar yenilenip ve verimli yeni sistemlerle değiştirilmektedir. Binaların buldukları yerdeki yenilenebilir enerji potansiyellerinin değerlendirilmesi ve binaya entegre edilmesi diğer aşamalara ilave olarak yapılmaktadır.

3. MATERYAL VE METHOD

Çalışma kapsamında seçilen örnek bina üzerinde Binalarda Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi (BEP-HY) tabanlı BEP-TR2 yazılımı kullanılarak farklı yenileme senaryoları uygulanmıştır. Seçilen enerji verimli yenileme senaryolarıyla binanın değişen yıllık enerji ihtiyacı ve sera gazı emisyonları hesaplanmıştır. Örnek mevcut bina Edirne de 2010 yılında ruhsat almış olan 2 katlı, bağımsız 2 kattan oluşan bir konuttur. Binaya ait özellikler Çizelge 4’de verilmektedir. Betonarme iskelet sistemi ile inşa edilmiş olan konut: bodrum, zemin ve 1. kattan oluşmaktadır. Binada ısıtma sistemi bireysel kombi ve doğal gaz ile sağlanmakta herhangi bir mekanik havalandırma sistemi bulunmamaktadır. Binaya ait mimari plan, model ve sistem kesiti özellikleri Şekil 1’de gösterilmektedir. Binanın zemin ve 1.katı ısıtılmakta, bodrum katı ısıtılmamaktadır. Bina mimari ve kabuk özelliklerine göre modellenerek BEP-BUY V30 da enerji ihtiyacı hesap sonuçları alınmıştır. Hesaplar binada mevcut (yalıtımsız) durumla (S1) birlikte 4 farklı senaryo (S2, S3, S4, S5) uygulandığı kabul edilerek yapılmıştır. Bu senaryolarda bina kabuğunda, ısıtma, soğutma, sıcak su, aydınlatma ve güç sistemleri ile yenilenebilir enerji sistemlerine yönelik değişiklikler uygulanmıştır.

Çizelge 4: Örnek bina özellikleri.

Fonksiyon / Ruhsat / Konum	Konut / 2010/ Edirne
Toplam Alan (m ²)	346,69
Kullanım Alanı (m ²)	190,47
Isıtılan Hacim (m ³)	439.79
A/V	0,79
Kat yüksekliği (m) - Kat adedi	2,8 - Bodrum +Zemin +1 Normal Kat
İmar Durumu	Ayrık düzen
Yapım sistemi	Betonarme iskelet, yatay delikli tuğla duvar dolgu (19cm)
Çatı	Sıcak teras çatı
Yakıt sistemi ve türü	Bireysel kombi, doğal gaz
Havalandırma	Doğal havalandırma



Şekil 1: Bina mimari plan (a), model (b) ve sistem kesiti(c).

Öncelikle senaryolarda bina kabuğundaki ısı kayıpları azaltılarak binanın enerji korunumlu hale getirilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle opak ve saydam yüzey alanlarında ısı korunumu açısından uygulanan yalıtım önlemleri arttırılmıştır. Yalıtım kalınlıklarının arttırılması ile opak ve saydam yapı elemanlarının U Değeri (Isıl geçirgenlik katsayısı/W/m²K) düşürülmesi hedeflenmiştir. Çizelge 5’de binaya uygulanan yalıtım kalınlıkları ve yapı elemanlarının değişen U (Isıl geçirgenlik katsayısı) değerleri görülmektedir. Opak elemanlardan döşeme de U Değeri 3,09 W/m²K den 0,23 W/m²K indirilmiştir. Saydam yapı elamanı pencere de U Değeri 2,7 W/m²K den 1,1 W/m²K düşürülmüştür. Ayrıca güneşten enerji kazanım sistemleri, aydınlatma armatürleri, kullanılan kombi sisteminin değiştirilmesi de senaryolara dahil edilmiştir (Çizelge 6). Enerji verimli iyileştirme aşamaları basit yenilemeden derin yenilemeye doğru gidecek şekilde oluşturulmuştur. Senaryo 5’de yapı elemanları duvar, çatı, zemin elemanları yalıtımlı (2 cm ile 15 cm arasında değişen), ısıtma ve aydınlatma iyileştirilmiş bunlara yenilenebilir enerji katkısı ilave edilmiştir. Binada aktif güneş enerji sistemlerinden fotovoltaik panel (PV/PhotoVoltaic Panel) güneş kolektörü (Solar Thermal Panel-STP) kullanılmıştır. Bina teras çatısına 30 derece eğimle 12 adet fotovoltaik panel (Multi Kristalin Silikon Modül), 4 adet güneş kolektörü eklenmiştir.

Çizelge 5: Binaya uygulanan senaryo kabulleri ve yapı elemanlarının U (Isıl Geçirgenlik Katsayısı) değerleri.

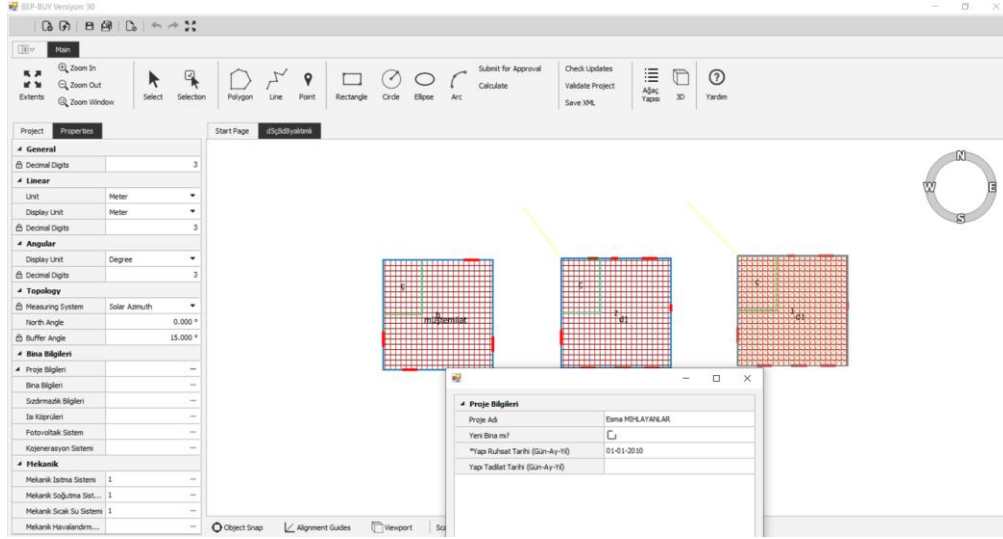
Bina Özellikleri	U Değeri Isıl Geçirgenlik Katsayısı (W/m ² K)				
	S1	S2	S3	S4	S5
Yapı elemanı					
Duvar	1,31	0,51	0,45	0,37	0,37
Döşeme	3,09	0,40	0,28	0,23	0,23
Tavan	2,75	0,43	0,30	0,24	0,24
Pencere	2,7	2,1	1,6	1,1	1,1

Çizelge 6: Binaya uygulanan senaryo kabulleri, yapı elemanları yalıtım kalınlıkları, aydınlatma ve ısıtma sistemi özellikleri.

Bina Özellikleri	Yapı Elemanlarına Uygulanan Yalıtım Kalınlıkları (cm)				Aydınlatma (armatür)	Isıtma Sistemi
	Çatı	Zemin	Duvar	A.kat döşeme		
Mevcut, yalıtımsız (S1)	0	0	0	0	Enkandesan	Konveksiyonel kombi
Yalıtım yapıldı=(S2)	8	8	5	2	K.florasan	Yoğuşmalı kombi
Yalıtım arttırıldı=(S3)	13	12	6	2	LED	Yoğuşmalı kombi
Yalıtım arttırıldı=(S4)	15	15	8	2	LED	Yoğuşmalı kombi
Yalıtımlı (S4) +aktif güneş sistemleri eklendi= (S5)	15	15	8	2	LED	Geliştirilmiş Yoğuşmalı kombi

3.1. Bulgular

Binaya ait tüm bilgiler BEP-BUY'a tanımlandıktan sonra (Şekil 3) senaryo kabullerine göre enerji ihtiyacı hesap sonuçları alınmıştır (Şekil 4). Enerji verimli yenileme senaryolarına göre toplam enerji tüketimi, sera gazı emisyon sonuçları karşılaştırmalı olarak Çizelge 7 ve 8'de gösterilmektedir.



Şekil 3: Binaya ait verilerin BEP-BUY a aktarılması.

	Yıllık Enerji Tüketimi				Yenilenebilir Enerji			Bina Sınıfı	Co2 Sınıfı
	Nispet (kWh/yıl)	Birincil (kWh/yıl)	(kWh/m ² /yıl)	(kg CO2/m ² /yıl)	Birincil (kWh/yıl)	(kWh/m ² /yıl)	(kg CO2/m ² /yıl)		
Toplam	65790.30	68850.87	361.45	16.57	0.00	0.00	0.00	F 145	F 144
Isıtma	60084.52	60590.39	318.12	74.77	0.00	0.00	0.00	F 148	
Sıhhi Sıcak Su	3345.90	3370.80	17.70	4.16	0.00	0.00	0.00	D 102	
Soğutma	1264.08	2619.17	13.75	4.09	0.00	0.00	0.00	E 136	
Havalandırma	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	D 100	
Aydınlatma	1095.81	2270.52	11.92	3.55	0.00	0.00	0.00	E 137	
Fotovoltaik	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Kojenerasyon	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

Toplam Kullanılan Alan: 190.45 Binanın Toplam Alanı: 346.63

On Hesap Sonuç Raporu Excel

Net Enerji	Net Enerji Ref	Net Enerji Detay	PhiZones	PhiHeatings	PhiCoolings	Aydınlatma	Doğal Aydınlatma	İç Kazançlar	Güneş Kazançları	Isı Geçiş Zonu	Isı Geçiş Malzeme	Havalandırma	Bilgiler
Month	ZoneId	ZoneArea	HeatingNeed	CoolingNeed	HeatingTime	CoolingTime							
1	3	95.23	4.128.62	0.00	652	0							
2	3	95.23	3.160.21	0.00	556	0							
3	3	95.23	3.677.63	0.00	634	0							
4	3	95.23	2.170.94	0.00	540	0							
5	3	95.23	686.27	0.00	405	0							
6	3	95.23	40.05	0.00	57	0							
7	3	95.23	0.00	294.32	0	267							
8	3	95.23	0.00	395.32	0	271							
9	3	95.23	100.00	0.00	85	0							
10	3	95.23	1.583.25	0.00	467	0							
11	3	95.23	3.144.30	0.00	571	0							
12	3	95.23	3.636.76	0.00	613	0							
1	8	95.23	4.240.08	0.00	664	0							
2	8	95.23	3.145.69	0.00	571	0							

Şekil 4: Binanın BEP-BUY da enerji ihtiyacının belirlenmesi.

Binanın toplam enerji tüketimi Senaryo 1'de 68.850 kWh/yıl iken Senaryo 5'de 15.706 kWh/yıl'a düşmektedir. Sonuçlar üzerinde opak yapı elemanlarına uygulanan yalıtım kalınlıklarının artırılması, saydam yapı elemanlarının (U değeri) iyileştirilmesi, aydınlatma armatürleri ve verimli ısıtma kontrol elemanlarının kullanılmasının etkisi görülmektedir. Önerilen yalıtım kalınlıkları ve sistemlerdeki değişiklikler mevcut binada uygulanabilirlik ölçütünde belirlenmiştir. Mevcut (yalıtımsız) konut binasına uygulanan farklı yenileme senaryolarında enerji tüketiminde mevcut yalıtımsız duruma göre %58 ile %77

arasında azalma olduğu görülmektedir. Ayrıca binada 12 adet fotovoltaik panel (PV) ilavesi yapılan Senaryo 5 ile 7345 kWh/yıl yenilenebilir enerji katkısı sağlanmaktadır. Mevcut (yalıtımsız) konut binasına uygulanan farklı yenileme senaryolarında emisyon salınımında mevcut yalıtımsız duruma göre %40 ile %67 arasında azalma olduğu görülmektedir.

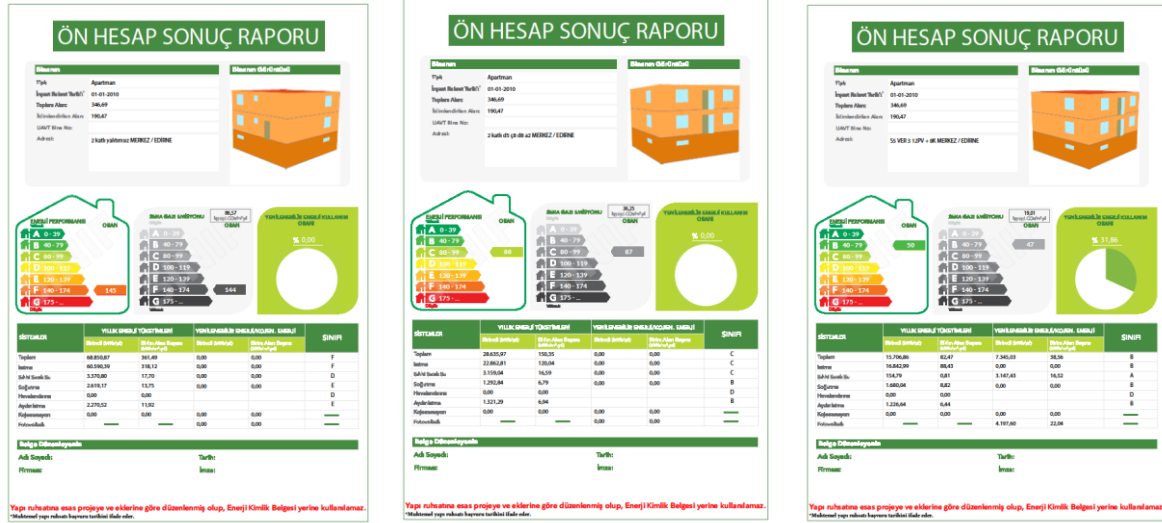
Çizelge 7: Binaya uygulanan enerji verimli yenileme senaryoları ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması.

Bina Özellikleri (Enerji Verimli Yenileme Senaryoları)	Toplam Enerji Tüketimi Birincil (kWh/yıl)	Birim Alan Başına (kWh/yıl)	Toplam Yenilenebilir Enerji Birincil (kWh/yıl)	Enerji Tüketimindeki Azalma oranı %
S1	68.850	361,49	-	-
S2	28.635	150,35	-	58
S3	25.454	133,64	-	63
S4	22.970	120,60	-	67
S5	15.706	82,47	7345	77

Çizelge 8: Binaya uygulanan enerji verimli yenileme senaryoları ile elde edilen sera gazı, CO₂/m²yıl, enerji performans sınıflarının karşılaştırılması

Bina Özellikleri (Enerji Verimli Yenileme Senaryoları)	Sera Gazı Emisyonu	kg eşd CO ₂ /m ² yıl	Enerji Performans Sınıfı	Emisyon Salınımındaki Azalma oranı %
S1	144	86,57	F	
S2	87	36,25	C	40
S3	79	32,39	B	45
S4	73	29,36	B	49
S5	47	19,01	B	67

Mevcut binaya; bina kabuğu, ısıtma, aydınlatma sistemleri ve yenilenebilir enerji sistemi (aktif güneş enerjisi) vb gibi yenileme seçeneklerinin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar farklılık göstermektedir. Uygulanan enerji verimli yenileme senaryolarıyla ile binanın yıllık enerji tüketimi, sera gazı emisyonu ve enerji tüketim sınıflarının değiştiği görülmektedir. Farklı yenileme seçeneklerinde yıllık enerji tüketiminde, sera gazı emisyonunda ve kg eşd CO₂/m²yıl miktarında düşüş görülmektedir. Bu düşüş aynı zamanda binanın enerji performans sınıfının iyileşmesini de sağlamaktadır. Konut binasının uygulanan enerji verimli yenileme senaryolarıyla (S1,S2,S5) elde edilen ön hesap sonuç raporları Şekil 5’de verilmektedir. Ön hesap sonuç raporunda bina özellikleri, enerji tüketim miktarları, sera gazı emisyonu ve enerji sınıfları ile yenilenebilir enerji kullanım oranları renkli olarak sembollerıyla görülebilmektedir. Senaryo 5 de uygulanan aktif güneş sistemleri kullanım yüzdesi %31,86 olarak ön hesap sonuç raporunda yer almaktadır.



Şekil 5: Binaya uygulanan enerji verimli yenileme senaryolarının ön hesap sonuç raporları.

4. SONUÇ

Küresel anlamda enerji verimliliğinin uygulanacağı en iyi alanlardan biri binalardır. Yeni binalar yasa, yönetmelik ve uluslararası şartlarla enerji verimliliğinde belirli koşulları sağlayabilmektedir. Mevcut binalarda yapılacak yenileme çalışmaları enerji performanslarının artırılması için büyük önem taşımaktadır. Ancak mevcut binaların enerji verimliliği adına yenilemesine karar verilmeden önce gerekli fizibilite çalışmalarının ve analizlerinin yapılması gerekmektedir. Enerji verimli bina yenileme senaryolarında seçim ve karar verme sürecinde maliyet etkin, pratik ve faydalı bir yaklaşım benimsenmelidir. Bu süreçte finansal, yasal, teknik ve uygulama zorlukları olmasına rağmen enerji verimli yenilemenin sağlayacağı kazanımlar oldukça önemlidir. Enerji verimli yenilemenin güvenli ve sürdürülebilir enerji, kullanıcılar açısından konforlu binalar, ekonomik büyüme, verimlilik, istihdam ve sosyal dayanışma açısından katkıları çok fazladır. Ancak gelişmiş ülkelerde bile mevcut binaların enerji verimli yenileme oranları halen düşüktür. AB de mevcut binalarda yenileme (renovasyon) oranı ülkeden ülkeye değişmekle birlikte yaklaşık %1 civarındadır. Bunun 2030'a kadar 2 katına çıkarılması, iklim hedefleri için %3 olması gerektiği belirtilmektedir [63]. Yapılan bir çalışmada Türkiye için yenileme oranının iyileştirilmiş U değerleriyle %1, 2030 da %2 olabileceği ön görülmektedir [64].

Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği kapsamında geliştirilen ulusal BEP-TR2 hesap yöntemi kullanılarak mevcut iki katlı bir müstakil konut örneği üzerinden yapılan bu çalışmada farklı yenileme (renovasyon) senaryoları incelenmiştir. Yapı kabuğu iyileştirmesinden başlayarak uygulanan sitemlerle farklı yenileme seçeneklerinde yıllık enerji tüketiminde, sera gazı emisyonunda ve kg eşd CO₂/m²yıl miktarında değişen oranlarda düşüş görülmektedir. Mevcut (yalıtımsız) konut binasına uygulanan yenileme

senaryolarında enerji tüketiminde %58 ile %77 arasında, emisyon salınımında %40 ile %67 arasında azalma olduğu görülmektedir. Bu düşüş aynı zamanda binanın enerji performans sınıfının iyileşmesini sağlamaktadır. AB de mevcut binalarda enerji verimli yenileme uygulamalarında yenilemeden elde edilen enerji korunumu oranları %30'a varan enerji korunumu "minör", %30-60 arasında "orta", %60-90 arasında "derin", +%90 "yaklaşık sıfır enerji bina/nZEB" olarak belirtilmektedir [65]. Bu çalışmada iki katlı konut binasına uygulanan farklı yenileme senaryoları ile orta seviyede iyileştirme yakalanmış ve derin yenileme oranına geçilmiştir. Bu çalışmanın konusu dışında kalan yenilemenin getireceği maliyet ise "minör" yenilemede 60 €/m², "orta" yenilemede 140 €/m², "derin" yenilemede 330€/m², "yaklaşık sıfır enerji bina/nZEB yenilemede 580 €/m² belirtilmektedir [65].

Türkiye de mevcut bina stoku verilerinin toplanıp sağlam binaların enerji verimli hale getirilmesi gerekmektedir. Bunun için bina tipolojileri, iklim ve bina kabuğu vb özelliklerine göre sürdürülebilir, uygulanabilir ve maliyet etkin bir yaklaşım ele alınmalıdır. Yenileme projelerine finans, teknik yardım vb konularda yönetim sistemlerinin, bütüncül bir yaklaşımla kullanıcıya destek olması, mevcut bina iyileştirmelerinde özellikle kamu ve tüzel kişilerin örnek olması, motive edici ve harekete geçirici eğitim ve bilgilendirmelerin yapılması gerekmektedir. Enerji verimliliğinin ilk adımı olan yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırılması öncelikli politika olarak geliştirilmelidir. Farklı bina fonksiyonları için enerji verimliliği destek projelerinin arttırılması gerekmektedir. Enerji verimli yenilemede profesyonel destek ve danışmanlık hizmetlerinin güçlendirilmesiyle Enerji Performans Sözleşmesi ve Enerji Performans Sertifikaları geliştirilmelidir. Ayrıca mevcut bina renovasyonları ulusal ve uluslararası projeler kapsamında desteklenerek sürecin hızlandırılması sağlanabilir.

Yeni ve mevcut binalar için EKB sınırı 50 m²'nin üzerindeki binalar için geçerlidir. Bu anlamda enerji verimliliği konusunda yasa ve yönetmeliklerle getirilen sınırlandırılmalar gözden geçirilmelidir. Uygulamadaki zorunlu enerji mevzuatı genişletilerek, denetimler arttırılmalıdır. Ülkemizde EKB uygulaması yeni binalar için C sınıfıdır. Ancak mevcut binalar için sınıf sınırı bulunmamaktadır. Mevcut bina stoku düşünüldüğünde mevcut binalar için de sınıf sınırının getirilmesi enerji tüketimi ve emisyonlarını azaltmak açısından faydalı olacaktır. Enerji verimliliği yüksek olan tasarım, malzeme ve ekipmanların binaya dahil edilerek; enerji talebinin azaltılması, pasif tasarımlara öncelik verilmesi, bina sistemlerinin verimliliklerinin arttırılması, bina enerji ihtiyacının yenilenebilir ya da atık vb kaynaklardan lokal olarak üretilmesine öncelik verilmelidir. Ülke genelinde yüksek performanslı inşaat standartlarının bir uygulama haline getirilmesi; bina enerji talebi ve emisyonları arttırmadan yapı sektöründe, konfor şartlarının sağlandığı enerji verimli binalar üretilmelidir. Yeni binaların yüksek performansla pasif tasarım ilkeleri ve yenilenebilir enerji kaynağı desteği ile tasarlanıp uygulaması ve mevcut binaların enerji verimli yenilenmesiyle belirlenen küresel iklim hedeflerine yaklaşılabılır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

E.M.: Kavramsallaştırma, yöntem, yazılım, doğrulama, formel analiz, araştırma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama, doğrulama, gözden geçirme ve düzenleme.

S.M.: Yöntem, yazılım, doğrulama, gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

- [1] <https://iklim.gov.tr/viyana-sozlesmesi-i-36>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [2] <https://iklim.gov.tr/montreal-protokolu-i-38>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [3] <https://iklim.gov.tr/kyoto-protokolu-i-35>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [4] <https://www.ecobuild.com.tr/post/cop-yani-bm-i-CC%87klim-de%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fi-%C3%A7er%C3%A7eve-s%C3%B6zle%C5%9Fmesi-araflar-konferans%C4%B1-nedir> , Erişim tarihi: 21.10.2023
- [5] <https://iklim.gov.tr/paris-anlasmasi-i-34>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [6] Khan, S. A. R., Ponce, P. & Yu Z. (2021). Technological Innovation and Environmental Taxes Toward A Carbon-Free Economy: An Empirical Study in the Context Of COP-21. *Journal of Environmental Management*, 298. 113418. doi:10.1016/j.jenvman.2021.113418
- [7] Rocco F., Oreste S. B. & Rosa M. (2022). Global Warming and Ozone Depletion Potentials Caused By Emissions From HFC and CFC Banks Due To Structural Damage. *Energy and Buildings*, Volume 273, 112385, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112385>.
- [8] <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html> , Erişim tarihi: 21.10.2023
- [9] IEA, International Energy Agency, <https://ww.iea.org/energy-system/buildings> , Erişim tarihi: 21.10.2023
- [10] Zhang H., Hewage K, Karunathilake H., Feng H.& Sadiq R. (2021). Research on Policy Strategies For Implementing Energy Retrofits in the Residential Buildings. *Journal of Building Engineering*, Volume 43. 103161. DOI:10.1016/j.jobbe.2021.103161
- [11] Jang H., Jones L.& Kang J. (2015). Prioritisation of Old Apartment Buildings For Energy Efficient Refurbishment Based on The Effects of Building Features on Energy Consumption in South Korea. *Energy Build.* 96. 319–328, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.027>.
- [12] Jie P., Zhang F., Fang Z., Wang H.& Zhao Y. (2018). Optimizing the Insulation Thickness of Walls and Roofs of Existing Buildings Based on Primary Energy Consumption. Global Cost and Pollutant Emissions, *Energy*, 159. 1132–1147, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.179>.
- [13] Heerema D., Frappé-Sénéclauze T.P & Wu K.T., (2017). Energy Regulations for Existing Buildings. Pembina Institute, https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=tr&as_sdt=0%2C5&q=Energy+Regulations+for+Existing+Buildings%2C+2017&btnG=, Erişim tarihi: 21.10.2023.
- [14] A Renovation Wave for Europe - Greening Our Buildings, Creating Jobs, Improving Lives, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [15] Ma Z., Cooper P., Daly D.& Ledo L. (2012). Existing Building Retrofits: Methodology and State-of-the-art”, *Energy and Buildings*, 55. 889–902. DOI:10.1016/j.enbuild.2012.08.018.

- [16] Du, H., Han Q. & Bauke D. V. (2022). Modelling Energy-Efficient Renovation Adoption and Diffusion Process For Households: A Review and A Way Forward. *Sustainable Cities and Society*. 77. 103560. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103560>
- [17] Liu Z., Yu C., Qian Q. K, Huang R., You K., Visscher H. & Zhang G. (2023). Incentive Initiatives on Energy-Efficient Renovation of Existing Buildings, Towards Carbon-Neutral Blueprints in China: Advancements, Challenges and Prospects. *Energy & Buildings*, 296. 113343. DOI:10.1016/j.enbuild.2023.113343.
- [18] Alabid J., Bennadji A. & Seddiki M. (2022). A Review on the Energy Retrofit Policies and Improvements of The UK Existing Buildings, Challenges and Benefits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159. 11216.
- [19] Kınay U., Laukkarinen A. & Vinha J. (2023). Renovation Wave of the Residential Building Stock Targets For the Carbon-Neutral: Evaluation By Finland and Türkiye Case Studies For Energy Demand, *Energy For Sustainable Development* 75.p:1–24. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.04.014>
- [20] Almedia M. & Ferreria M. (2018). Ten Questions Concerning Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation. *Building Environment* Volume 143, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.036>
- [21] Zengin N. & Yamaçlı, R. (2023). Mimari Tasarımda Değişen İklim ve Küresel Isınmanın Rolü, *Inonu University Journal of Art and Design*.53-71. ISSN: 1309-9876 E-ISSN: 1309-9884. <https://doi.org/10.16950/ijad.1225133>
- [22] WRI Ross Center for Sustainable Cities, <https://wrişehirler.org/arastirma/yayin/%C5%9Fehirlerde-bina-verimlili%C4%9Fi-%C3%A7ali%C5%9Fmalarinin-ivmelendirilmesi-accelerating-building>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [23] European Commission, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [24] Atmaca M. & Yılmaz Z. (2019). A Study on Energy and Cost Efficiency for Existing Hotel Buildings in Turkey, *E3S Web of Conferences* 111, 03037.
- [25] IEA, <https://www.iea.org/policies/1118-the-eu-energy-efficiency-directive-201227eu23>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [26] Gustafsson M., Gustafsson M. S., Myhren J. A., Bales C. & Holmberg S. (2016). Techno-economic Analysis of Energy Renovation Measures for a District Heated Multi-Family House. *Applied Energy*. Volume 177. 108-116.
- [27] Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/sectorlere-gore-nihai-enerji-tuketimi-i-85804>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [28] Anonim, 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5627&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [29] Anonim, Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği, 2008. Erişim tarihi: 21.10.2023
- [30] <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/02/20120225-7.htm> . Erişim tarihi: 21.10.2023
- [31] <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-verimlilik-ulusal-enerji-verimlilik-eylem-plani>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [32] <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/12/20171223-3.htm>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [33] <https://meslekihizmetler.csb.gov.tr/binalar-ile-yerlesmeler-icin-yesil-sertifika-yonetmeli-haber-272022>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [34] Ashrafian T., Yılmaz A. Z., Corgnati S. P. & Moazzen N. (2016). Methodology to Define Cost-Optimal Level of Architectural Measures for Energy Efficient Retrofits of Existing Detached Residential Buildings in Turkey. *Energy and Buildings*, 120. 58–77.
- [35] Akın, C.T. & Kaplan, S. (2019). Enerji Kimlik Belgelerinin Enerji Etkin Mimari Tasarım Kriterleri Açısından Değerlendirilmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi* 10:1. 373-384. DOI: 10.24012/dumf.523911.

- [36] Anonim, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı BEP-TR Eğitim Klavuzu, <https://beptr.csb.gov.tr/bep-web/#/>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [37] Erikci, S. N. & Zorer Gedik, G. (2015). Bina Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi (Bep-Tr) Kapsamında, Farklı İklim Bölgelerinde Yapı Biçimi Dönüşümünün ve Zon Sayısı Hesabının Değerlendirilmesi. 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi.
- [38] Anonim <https://www.iso.org/standard/41974.html>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [39] Aydın, Ö. & Canım D. S. (2017). Binalarda Enerji Performansı Hesaplama Yöntemi (BEP-TR1)' in Kullanılabilirliğinin ve EKB Uygulamasının Değerlendirilmesi, *Mimarlık ve Yaşam Dergisi*. Cilt: 2, No: 2, 265-277.
- [40] Anonim, <https://resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/02/20220219-2.htm>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [41] Republic of Türkiye Update First Nationally Determined Contribution, <https://www.kreafin.com.tr/en/post/t%C3%BCrkiye-updated-first-nationally-determined-contribution-ndc>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [42] Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü Eylül 2023 Sayısal Veriler, https://webdosya.csb.gov.tr/db/meslekihizmetler/menu/mhgm-2023-yili-eylul-ayi-faaliyet-raporu_20231002122725.xlsx, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [43] Harputlugil, G. U. (2012). Assessing the Accuracy of National Calculation Methodology of Türkiye (BEP-tr) by Using BESTEST, ICONARCH-I, Proceedings of International Congress of Architecture-I, 66-75.
- [44] Durmuş G. & Önal S. (2014). Evaluation of Building Energy Performance Construction Standards of the European Union: Example of Kayseri. *European Journal of Science and Technology* Vol. 1, No. 2, 52-58.
- [45] Yiğit K. & Acarkan B. (2016). Assessment of Energy Performance Certificate Systems: A Case Study For Residential Buildings In Turkey, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. Vol:24. 4839-4848. doi:10.3906/elk-1407-87.
- [46] Akyürek Z., Akyüz A. Ö. & Güngör A. (2019). Investigation of Ideal Buildings in terms of Energy Performance Value and Energy Identity Certificate in Antalya and Erzurum, *International Journal of Engineering, Design and Technology* 1(2): 36-41. E-ISSN: 2667-5374, <http://dergipark.org.tr/ijedt>.
- [47] Küçük A.A. & Sümengen Ö. (2022). Evaluation of the Lighting Energy Performance of Educational Buildings with BEP-TR Methodology: The Case of ERU Faculty of Architecture. *ICONARP/International Journal of Architecture and Planning*. Volume 10, Issue 2.482-502. DOI: 10.15320/ICONARP.2022.212 E- ISSN:2147-9380.
- [48] Bilen K., Urmamen E., Topcu M.T. & Solmaz I. (2020). Evaluations On The Energy Identity Certificate And The Usability Of Calculation Method Of Building Energy Performance (BEP). *Sigma J Eng & Nat Sci* 11 (1), 103-113.
- [49] Harputlugil G. U., Yılmazozlu M. Z. & Unlu G. (2019). Assessing the Reliability of Turkish Building Energy Performance Tool (BEP-TR2) by Case Tests. E3S Web of Conferences 111, 04052. CLIMA 2019, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2019111040>,
- [50] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <https://enerji.gov.tr/enerji-verimliliği>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [51] Harputlugil, G.U., Harputlugil, T., & Wilde, P. De. (2009). Thermal Design of Turkish Schools: Prospects for an Improved Pre-design Process. *Architectural Engineering and Design Management*, 5(3). 153-164.
- [52] Al-Kodmany K. (2014). Green Retrofitting Skyscrapers: A review, *Buildings-4*. 683-710.
- [53] Aydın D. & Mıhlayanlar E. (2017). Mevcut Yüksek Yapıların Enerji Verimliliği İçin Bir Çözüm: Retrofit. *UHMFĐ /Uluslararası Hakemli Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, ISSN 2017.07830. (9), 1-25.
- [54] Nair, G., Verde, L. & Olofsson T. (2022). A Review on Technical Challenges and Possibilities on Energy Efficient Retrofit Measures in Heritage Buildings. *Energies* 15, 7472. <https://doi.org/10.3390/en15207472>
- [55] Caputo P. & Pasetti G. (2017). Boosting the energy renovation rate of the private building stock in Italy: policies and innovative GIS-based tools, *Sustain. Cities Soc.* 34 394-404, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.07.002>.

- [56] Weiss J., Dunkelberg E. & Vogelpohl T. (2012). Improving Policy Instruments to Better Tap into Homeowner Refurbishment Potential: Lessons Learned From A Case Study in Germany. *Energy Pol.* 44. 406–415. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.006>.
- [57] Atmaca, M. (2016). *Avrupa Birliği Bina Enerji Performansı Direktifi'nin Türkiye'deki Mevcut Otel Binaları İçin Uyarlanmasına Yönelik Bir Yaklaşım*. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Bilimleri Programı, Doktora Tezi. İstanbul.
- [58] Liu G., Li X., Tan Y. & Zhang G. (2020). Building Green Retrofit in China: Policies, Barriers and Recommendations, *Energy Policy* 139.111356.
- [59] Ashrafian T., Yılmaz Z. & Moazzen N. (2019). A Long-term Strategy for Energy and Cost Performance Improvement of Existing Residential Buildings: Step-by-step Renovation in Turkey, E3S Web of Conferences 111 CLIMA 2019, 03040. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911103040>,
- [60] Brand M. & Svendsen S. (2013). Renewable-based Low-temperature District Heating For Existing Buildings In Various Stages Of Refurbishment. *Energy* 62, 311e319. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.027>
- [61] Wahi P., Konstantinou T., Tenpierik M. J. & Visscher H. (2023). Lower Temperature Heating Integration in The Residential Building Stock: A Review of Decision-Making Parameters For Lower-Temperature-Ready Energy Renovations. *Journal of Building Engineering* 65, 105811. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105811>.
- [62] Hamburg A., Kuusk K., Mikola A. & Kalamees T. (2020). Realisation of Energy Performance Targets of an Old Apartment Building Renovated to nZEB, *Energy* 194, 116874. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116874>
- [63] Minimum Standards, Maximum Impact: How to Design Fair and Effective Minimum Energy Performance Standards, <https://www.bpie.eu/publication/minimum-standards-maximum-impact-how-to-design-fair-and-effective-minimum-energy-performance-standards/>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [64] Türkiye için U-Değerleri Haritaları, 2016 raporu, ecofys. <https://www.izoder.org.tr/haber/28/turkiye-u-degerleri-haritasi-raporu-2016-ingilizce>, Erişim tarihi: 21.10.2023
- [65] Europe's Buildings Under The Microscope, <https://www.bpie.eu/publication/europes-buildings-under-the-microscope/>, Erişim tarihi: 21.10.2023

Sinter Manyezit Üretimi Döner Fırınındaki Atık Isının Kojenerasyon Sistem Performansı ve Ekonomik Analizi

Samet Giray Tunca^{1*} , Abdullah Akbulut² 

¹Elektrik ve Enerji Bölümü, Dumlupınar Meslek Yüksekokulu, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye

²Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Çankırı, Türkiye

Geliş: 15.11.2023, Kabul: 27.11.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

ÖZ

Yüksek sıcaklıklarda çalışan sistemlerde ana işlem sonrasında atık ısının oluştuğu görülmektedir. Günümüzde birçok sektör atık ısıyı geri kazanımda değerlendirmektedir. Çalışmamızda fabrikada yapılan üretimde ortaya çıkan atık ısının değerlendirilmesi ile ilgili aşamaları içermektedir. Özel bir fabrikada üretim aşamasında Döner fırınlar kullanılmaktadır. Döner fırınlar doğalgaz ve petrokok karışımı ile yakılmaktadır. Ateşlenen fırınlara manyezit madeni beslenmektedir. Döner fırınlardaki üretim süresince baca gazı oluşmaktadır. Baca gazı atık ısı kazanına gelerek kojenerasyon ünitesi için hazırlanmaktadır. Atık ısı kazanında oluşan buhar türbine gönderilerek enerji üretilmektedir. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına göre enerji ve ekserji hesaplamaları yapılmıştır ve sistemin çalışma verimi hesaplanmıştır. 3. Döner fırında yakılan petrokok ve doğalgazın enerji değerleri 13 MW ile 20.5 MW arasında değişirken, kazandan elde edilen enerji 3.6 MW ile 5.14 MW arasında değişmektedir. Kojenerasyon ünitesinde elde edilen anlık elektrik enerjisi değerleri ise 267 kWh ile 551 kWh arasında değişmektedir. Kazan için ortalama I. ve II. Yasa verimleri sırasıyla %20 ve %35 olarak hesaplanmıştır. Net bugünkü değer (NBD) yöntemi kullanılarak sistemin ekonomik analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji; ekserji; kojenerasyon; atık ısı; NBD yöntemi

Cogeneration System Performance and Economic Analysis of Waste Heat in Sinter Magnetite Production Rotary Kiln

ABSTRACT

It is observed that waste heat is generated after the main process in systems operating at high temperatures. Nowadays, many sectors use waste heat for recycling. In this study includes the stages related to the evaluation of waste heat generated in factory production. Rotary kilns are used in the production phase in a private factory. Rotary kilns are burned with a mixture of natural gas and petcoke. Magnesite ore is fed into the fired furnaces. Flue gas is formed during production in rotary kilns. Flue gas comes to the waste heat boiler and is prepared for the cogeneration unit. Energy is produced by sending the steam formed in the waste heat boiler to the turbine. Energy and exergy calculations were made according to the first and second law of thermodynamics and the operating efficiency of the system was calculated. While the energy values of petcoke and natural gas burned in the 3. rotary kiln vary between 13 MW and 20.5 MW, the energy obtained from the boiler varies between 3.6 MW and 5.14 MW. Instant electrical energy values obtained in

the cogeneration unit vary between 267 kWh and 551 kWh. Average for boiler is I. and II. Law efficiencies are calculated as 20% and 35%, respectively. An economic analysis of the system was made using the net present value (NPV) method.

Keywords: Cogeneration; exergy; energy; waste heat; NPV method

1. GİRİŞ

Birçok alanda kullanılabilir enerjiye çevrilmesi gereken atık ısı elde edilen prosesler mevcuttur. Endüstriyel enerjinin yatırım yapılabilecek kadar büyük bir kısmı atıl bir şekilde kaybolmaktadır. Bu kayıplar atık ısının en aza indirilmesi ve geri kazanımı ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu enerjinin tekrar kazanılması için atık ısı kazanları, eşanjörler ve ısı boruları gibi sistemler kullanılır. Bu geri dönüşüm sistemlerine yatırım yapılması ancak atık ısının yeterli sürede ve yeterli miktarda elde edilebiliyor olması gerekmektedir. Bu sistemlerin fizibilitesi yapılırken akışkanın debisi, nem, basınç ve sıcaklık değerleri önemli parametrelerdir, Sistemin kendisini amorti etmesi zaman bağlı bir durumdur. Sürenin kısılması sistemin süreklilik arz etmesiyle mümkün olabilir. (Çengel, Boles, & Kanoğlu, 2019).

Bir çimento fabrikasında 7,5 MW kapasitesi ile kurulan atık ısı geri kazanım sistemi mevcuttur. Yapılan çalışmada bu sisteme ait enerji-ekserji analizi yapılmıştır. Toplam ekserji verimi %69,5 bulunmuştur. Yapılan atık ısıdan geri kazanım sayesinde çevre etkisi açısından CO₂ emisyonunda 16 ton/yıl azalma gerçekleşmektedir. (Memiş, 2019).

Yapılan çalışmada reküperatör ve ısı tekeri ile atık ısı geri kazanım ısı değerleri incelenmiştir. Alınan verilerde verim açısından en yüksek değerler ısı tekeri için %97 ve reküperatör için %73 olarak elde edilmiştir. (Karanfil, Rüşen, Poyraz, & Güler, 2020).

Bu çalışmada bisküvi fırını akış şeması oluşturularak her bir düğüm noktası için termodinamik analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda bisküvi fırınının enerji veriminin %3,90 olduğu tespit edilip harcanan enerjinin %49,35'inin atık ısı olarak bacadan atmosfere salındığı tespit edilmiştir. net bugünkü değer (NBD) yöntemi ile organik rankine çevriminin maliyet analizi yapılmıştır. Sistemin çalışma ömrünün 20 yıl olarak kabul edildiği tasarım sonucunda iş akışkanı olarak R113'ün kullanılan çevrimde 58,62 kW elektrik enerjisi üretilip net bugünkü değeri (NBD) 1,979 milyon \$ olarak hesaplanmıştır (Erdoğan, 2023).

Dikili (2019) tarafından yapılan tez çalışmasında 410,8 MW kapasiteli doğalgaz kombine çevrim güç santralının enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Birinci ve ikinci yasa verimleri sırasıyla %55,88, %53,06 olarak hesaplanmıştır. Kayıp en yüksek kondenserde daha sonra da baca gazından kayıp olan güç olarak belirlenmiştir. Tersinmezlik en yüksek yanma odasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. (Dikili, 2019).

Bu çalışmada, bir firma bünyesinde kurulması düşünülen birleşik ısı-güç çevrim santral tesisi ele alınıp incelenerek termodinamik analizler yapılmıştır. 5 MW'lık kurulu güce sahip bir tesisin kurulması düşünülmüş, bunun için gerekli maliyet analizi yapılmıştır. Firmanın mevcut yakıt, sıcak su ve elektrik enerjisi maliyetleri toplamı ile kojenerasyon kurulduktan sonraki yakıt artışı tesis maliyeti değerlendirilmiştir (Güven, Ekmekçi, & Çiçek, 2003).

Enerji kayıpları, dizayn ve ekonomik açılardan sistemlerin değerlendirilmesi için enerji-ekserji analizleri önem arz etmektedir. Enerji kayıplarının nedenlerinin büyüklüklerinin ve sistem içerisindeki yerinin tespit edilmesinde yapılan analizler sistem verimini arttırmaktadır.

Yapılan verimlilik çalışmasında atık ısıdan üretilen elektrik enerji tesisinin etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar atık ısı kazanım sistemlerinin kurulumu-dizaynı, işletilmesi ve ekonomik açıdan fayda sağlayacak bir çalışma olmuştur. (Tütüncü & Özgener, 2016).

Termik santralde bölgesel ısıtma sistemi uygulanma şekli, tasarımı ve elektrik üretimi ile ilgili bilgilerin hesaplandığı çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada geri dönüş süresi ve mühendislik açısından veriler bulunmaktadır (Kolay, 2004).

Yapılan çalışmada ısıtma amaçlı kullanılmakta olan sıcak su kazanından atılan baca gazlarından faydalanarak çalışan ısı geri kazanım sistemindeki verim değeri yapılan deneyler sonucu yaklaşık %20 seviyesinde çıkmıştır (Kuvel, 2005).

Geleneksel soğutma sistemlerine göre ejektör kullanımı verim değerini düşürmektedir. Fakat çevre etkileri açısından avantajlı olduğu tespit edilmiştir (Ersayın, 2020).

Bölgesel ısıtma sisteminde baca gazından kaynaklanan kayıplar hesaplanmıştır. Yapılan çalışmada atık ısı kaynı yaklaşık %6-8 arasında elde edilmiş ve giderin 58.658,79 \$ /yıl olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir hesaplamada ise sıcak su ihtiyacının karşılanması ile ilgili yapılmıştır. Sistemin 20 yıl olan ekonomik ömrü boyunca 122.820,83 \$ enerji tasarrufu olabileceği görülmüştür (Terhan , Özağdaş, & Omar, 2023).

Tasarlanan hermetik kombilerin atık ısıdan elektrik elde edilmesi için kullanılacaktır. Kaloriferde en düşük güç değeri iç dış sıcaklığı 35 °C ve 20 °C iken 57,83W, en yüksek güç değeri ise iç dış sıcaklığı 85 °C ve -20 °C 273,6 W olarak bulunmuştur. Kullanım suyundaki güç açısından en düşük değer iç dış sıcaklığın aynı olduğu 35 °C' de 31,19 W ve en yüksek değeri iç dış sıcaklığın 65 °C ve -20 °C iken 273,6 W olarak bulunmuştur. (Variyenli & Göktekin, 2018).

Yazıcı H. ve Selbaş R., yaptıkları çalışmalarında buharlı güç santralinin enerji-ekserji analizini yaparak sistemin toplam tersinmezliğini hesaplamışlar ve tersinmezliğin en fazla olduğu sistem elemanını incelemişlerdir (Yazıcı & Selbaş, 2011).

El-Masri güç santralinde buhar türbini kısmında ekserji hesaplamaları yapmıştır. Elde ettiği veriler ile kayıpları, ekserji bozunumları ve net iş arasında bulunan ilişkiyi tanımlamıştır (El-Masri, 1997).

Harlock, sistem verimlerini tanımlamıştır. Yaptığı çalışmada kapalı sistemler için termik verimin net işin verilen ısıya oranı ile hesaplanabileceğini, açık sistemlerde ise net işin ideal şartlardaki tersinir işe oranı olduğunu vurgulamıştır (Harlock, 1995).

Ballı Ö., Eskişehir’de bulunan gaz türbini motorlu bir kojenerasyon sisteminin performans değerlendirmelerini yapmıştır. Birinci ve ikinci kanunu uygulayarak enerji-ekserji analizlerini yapmıştır. Enerji kaybının en yüksek olduğu çevrim elemanının kondenser olduğu hesaplamıştır (Ballı, 2008).

Mert M.S., tarafından Ereğli’de Kurulu olan kojenerasyon ve konvansiyonel elektrik üretim tesisleri incelenmiştir. Veriler toplanarak enerji-ekserji, kütle, maliyet denklilikleri kurulmuştur. Sistemdeki her bir birimin ekserji ve termodinamik analizleri yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda ekserji tahribinin en fazla olduğu birimlerden birinin buhar kazanı olduğu ve döner hava ısıtıcılarından sızan havanın baca gazına karıştığı tespit edilmiştir. Mert M.S., hava sızıntısının önüne geçilerek enerji ve ekserji analizlerinin iyileştirilebileceğini anlatan bir çalışma yapmıştır (Mert, 2010).

Bilginsoy A.K., çalışmasında termik gücü 160 MW olan bir termik santralin enerji ekserji analizlerini yapmıştır. Sistemin enerji ve ekserji kayıpları hesaplayıp, en fazla enerji kaybının %45,8 ile kondenserde, ekserji kaybının en fazla %58,05 ile kazanda olduğu tespit etmiştir. Ekserji kaybının en fazla kazanda oluşmasının en önemli sebebi, yanma işlemindeki sıcaklık farklarının etkisiyle oluşan ısı transferi olduğunu tespit etmiştir. Sonuç olarak A. Bilginsoy çalışmasında termik santralin yeniden dizayn edilmesi gerektiğini, borulama hatlarındaki yalıtım malzemelerinin yıpranmış olması ekstra bir ısı kaybının olduğunu ve kazandaki yüksek çıkan tersinmezlik değeri için gerekli analizlerin ve yenilemelerin yapılması gerektiğini anlatmıştır (Bilginsoy, 2012).

Bir magnezyum üretim şirketinde dolomitin kalsinasyonu için kullanılan döner fırının enerji dengesi yazılarak, ısı kaybının en büyük kaynağı belirlenmiştir. Isı kaybını azaltmak için, fırının kireçleme bölgesi üzerinde halkalı bir kanal oluşturan bir ısı değiştirici kullanılmıştır. Kullanılan ısı değiştirici fırının yakıt tüketimini %12.00 oranında azaltmış ve enerji ve ekserji verimini sırasıyla %7.35 ve %3.81 oranında artırmıştır (Tunca, 2015).

Endüstride en yüksek enerji sarfiyatının yapıldığı sektörlerin başında çimento sektörü gelmektedir. Bu nedenle, enerji tasarrufu açısından araştırmalar ve uygulanabilir süreçler ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Altınkaynak M., çalışmasında enerji tüketiminin yaklaşık 75kW/ton üretim başına olduğu fabrikanın verilerini kullanmıştır. Üretim aşamasında bulunan döner fırına ait enerji-ekserji ve kütle hesaplamalarını yapmıştır. Enerji ve ekserji verimi sırasıyla %49.2 ve %58.6 olarak hesaplanmıştır. Analizlere göre kayıplar hatlardan, fırın yüzeyinden ve baca sisteminden kaynaklandığı tespit edilmiştir (Altınkaynak, 2012).

Gürtürk M., çalışmasında enerji-ekserji ve ekonomik analizlerini döner fırın sisteminde gerçekleştirmiştir. Enerji verimi döner fırında %69 bulunmuştur. Ekserji verimi ise &16 olarak bulunmuştur. Yine döner fırındaki eksergoekonomik faktör %70 hesaplanmıştır. Çalışmadaki analizler sayesinde kayıplar ve sistemin olumsuz çalışma koşulları belirlenmiştir (Gürtürk, 2015).

Shrikant K. ve Alok C. yaptıkları çalışmada Birla çimento fabrikasının ekserji analizini yaparak ekserji verimliliği ve dengesi hesaplanmıştır. Prosesin ortalama fiili çalışma verilerine dayanarak, ekserji dengeleri ön ısıtıcı, döner fırın, döner soğutucu ve tüm proses için oluşturulmuştur. Sistemin elektrik ihtiyacı atık ısı geri kazanım sistemi kullanılarak azaltılabilir (Shrikant & Chaube, 2013).

Net bugünkü değer indirgeme tekniğine dayanmaktadır. Bu teknikte nakit akış tablosu proje boyunca oluşan gelir ve gider yıl bazında belirlenir. Belirlenen indirgeme oranı her yıl için ayrı şekilde kullanılır ve elde edilen verinin toplamı projenin “Net Bugünkü Değeri” ni oluşturur.

Bu çalışmada, atık ısı buhara çevrilerek sistemden alınabilecek enerji hesaplanmış ve sistem aşamalarındaki elde edilen veriler ele alınmıştır. Manyezit yüksek sıcaklıklarda döner fırınlara beslenir ve burada oluşan baca gazı baca çıkışından önce atık ısı kazanına gelmektedir. Atık ısı kazanında türbine gönderilen buhar değerlendirilerek enerji üretilmektedir.

Türbine gelecek buhar basıncı ve debisi 20 bar ve 8 t/h olarak tasarlanmıştır. Buhar sıcaklığı 343 °C.’dir. Çevrimin çalışma koşulları ve verileri Döner fırından başlayarak analiz edilmiştir. Net bugünkü değer kullanılarak ekonomik analiz yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Kojenerasyon tesisinde, 3. Döner fırın kazanında üretilen buhar ile elektrik enerjisi üretilmekte, çürük buhar yoğunlaştırılarak sıcak su oluşmasını sağlamak ve su kazana geri beslenerek su tüketimi düşürülerek tamamen kapalı bir çevrim yapılmaktadır. Kojenerasyon ünitesinde herhangi bir atık bacası bulunmamaktadır.

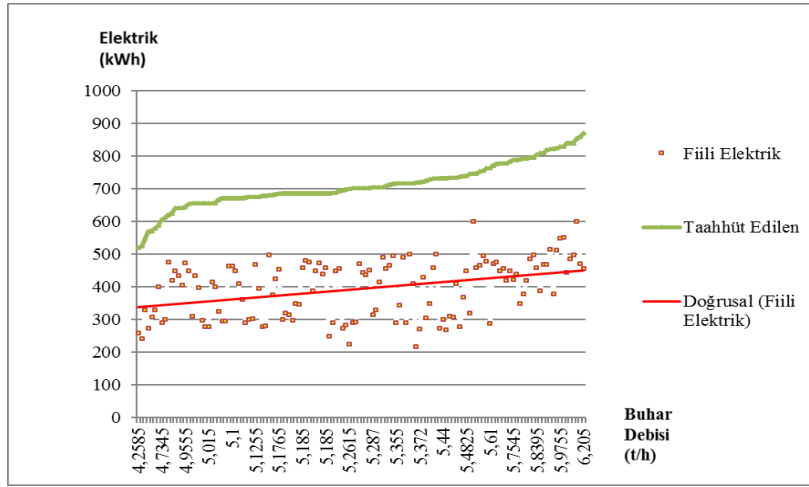
2.1. Kojenerasyon Sistemi

Kojenerasyon tesisinde verim buhar üretim kapasitesi ile doğrudan ilgilidir. Buhar türbinine gelen buhar debisi arttıkça verim de artmaktadır. 3. Döner fırınlara beslenen manyezit miktarı, türü ve çalışma süresi buhar türbinin üretiminde değişkenlikler olmasına sebep olmaktadır. 3. Döner fırın ateşlemesinde doğalgaz ve petrokok yakıtları kullanılmaktadır. Döner fırının çalışma sisteminde ateşleme sonrasında oluşan yüksek sıcaklıktaki baca gazı döner fırın çıkışında atık ısı kazanına gelir. Kazan içerisindeki borulardan geçen sıcak su döner fırından gelen baca gazı sayesinde kızgın buhara dönüşür. Kızgın buhar buhar türbinin bulunduğu kojenerasyon ünitesine, döner fırından kazana gelen atık gaz ise bacadan atılmak için tozsuzlaştırma için

filtreye gönderilmektedir. Türbin verilerinin istenilen düzeyde olması için buhar özellikleri 8t/h, 343 °C ve 20 bar basınç olmalıdır.

2.2. Deneysel Çalışma

Fabrikada iki aylık süreç boyunca her gün günde iki defa alınan veriler neticesinde aşağıdaki grafikler oluşturulmuştur. Türbine gönderilen buhar sıcaklığı dikkate alınarak elde edilen anlık enerji verileri gösterilmiştir.



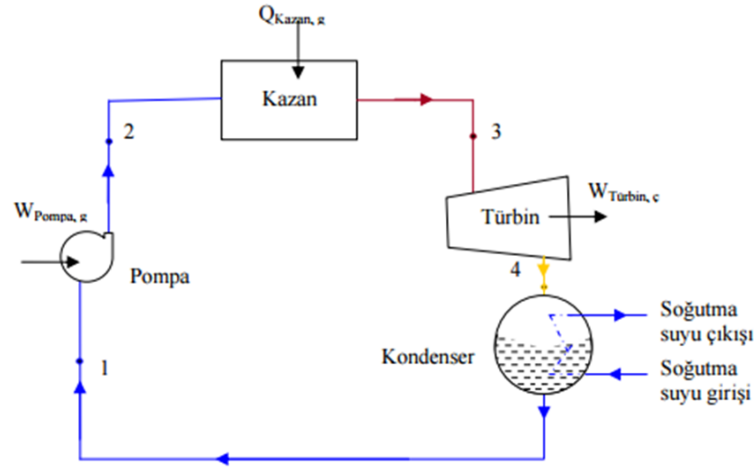
Şekil 1: Anlık enerji grafiği

Türbin sistemini kuran firmanın taahhüt ettiği değerleri ve sistemin mevcut şartlardaki çalışma durumundaki değerleri görmekteyiz. Sistemin mevcut çalışma durumundaki buhar debisine karşılık üretmesi gereken elektrik enerjisi 500-900 kWh değerleri arasındaki eğridir. Fakat mevcut çalışma durumunda üretilen elektrik enerjisi değerleri inişli –çıkışlı bir durumda olup, genel olarak 250-500 kWh değerleri arasındadır.

3. BUHAR TÜRBİNİ ÇEVİRİMİ, BİRİNCİ KANUN VE İKİNCİ KANUN DENKLEM ÇÖZÜMLEMELERİ, ENERJİ EKSERJİ ANALİZLERİ

3.1. Buharlı Türbin Çevrimi Birinci Kanun Analizi

Birinci kanun analizi yapılırken amaç ısı verimin bulunmasıdır. Isıl verim kazan yoğunlaştırıcı, türbin ve pompadan gelen veriler ile elde edilir. Yapılan çalışmada çevrimde bulunan her elemana birinci kanun uygulanmıştır.



Şekil 2: Rankine çevrimi

3.1.1. Pompa Birinci Kanun Analizi

a-) Kütle korunumu yasası

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (1)$$

b-) Enerji korunumu yasası

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 - \dot{W}_p \eta_p \quad (2)$$

$$\dot{W}_p = (\dot{m}_s (h_2 - h_1)) / \eta_p \quad (3)$$

3.1.2. Kazan Birinci Kanun Analizi

a-) Kütle korunumu yasası

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

b-) Enerji korunumu yasası

$$Q_k = \dot{m}_s (h_3 - h_2) \quad (4)$$

3.1.3. Türbin Birinci Kanun Analizi

a-) Kütle korunumu yasası

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_s$$

b-) Enerji korunumu yasası

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{W}_T \eta_T \quad (5)$$

$$\dot{W}_T = (\dot{m}_s (h_3 - h_4)) / \eta_T \quad (6)$$

3.1.4. Kondenser Birinci Kanun Analizi

a-) Kütle korunumu yasası

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 = \dot{m}_5$$

$$\dot{m}_{ssg} = \dot{m}_{ssç} = \dot{m}_{ss}$$

b-) Enerji korunumu yasası

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{ssg} h_{ssg} = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{ssç} h_{ssç} \quad (7)$$

$$\dot{m}_s (h_4 - h_1) = \dot{m}_{ss} (h_{ssç} - h_{ssg}) \quad (8)$$

3.2. Buharlı Türbini Çevrimi İkinci Kanun Analizi

Birinci kanun enerjinin niceliği ile ilgilidir. Enerjinin biçim değiştirmesindeki sayısal verileri ifade eder. Enerjiler arasında kaynak ve biçim açısından ayırım gözetmez. İkinci kanun ise enerjinin niteliği ile ilgilidir. Hal değişimlerinde niteliğin değişimini hesaplamak için yöntemler ortaya koyar (Horlock, 1995).

Sürekli akışlı açık sistemlerde ekserji analizi için temel denklemler;

$$\dot{E}_Q = Q((T - T_0)/T) \quad (9)$$

$$\dot{E}_W = \dot{W} \quad (10)$$

Ekserji dengesi;

$$E_Q - E_W = \sum m_c E_c - \sum m_g E_g + T_0 S_{\text{üretim}} \quad (11)$$

Burada \dot{E}_Q ısı transferinin birim zamandaki ekserjisi ve \dot{E}_W mekanik enerjinin birim zaman ekserjisi, E özgül ekserjiyi, T_0 çevre sıcaklığını ve $S_{\text{production}}$ entropi üretimini ifade etmektedir. ç alt çıkışı, g girişi göstermektedir. Sistemin her bir bileşeni için hesaplanan tersinmezlik sonrasında aşağıdaki denklem ile toplam tersinmezlik hesaplanır.

$$I = T_0 S_{\text{üretim}} \quad (12)$$

Burada I tersinmezliği ifade eder. Tersinmezlik birim zamanda kaybolan ekserjidir. Ekserji genellikle kimyasal ekserji ve termodinamiksel ekserjinin toplamı olarak kabul edilir. Termodinamiksel ekserji bir durumun çevre sıcaklığı ve basıncı ile dengedeki ekserjidir.

$$E = (h - T_0 s) + \left(\frac{1}{2}\right) v^2 + gZ - (h_0 - T_0 s_0) \quad (13)$$

Denklemden potansiyel ve kinetik enerji ihmal edilirse; fiziksel özgül ekserji;

$$E = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) \quad (14)$$

Buhar türbini sisteminde tersinmezliklerin hesaplanabilmesi için her bir eleman için giren ekserjinin ve çıkan ekserjinin bilinmesi gerekir.

$$\dot{W} = \sum \dot{E}_Q + \sum \dot{m}_g \dot{E}_g - \sum \dot{m}_c \dot{E}_c - I \quad (15)$$

3.2.1. Kazan Ekserji Analizi

Kazanın yapısı gereği bir çok ekserji formu oluşmaktadır. Sisteme gelen atık ısı içeriğinde bulunan yanma ürünlerinden, tersinmezliklerden ve ekonomizlerden kaynaklanan ekserji formları bulunmaktadır. Kazanın ekserji durumu proses adyabatik olarak kabul edildiğinde hesaplamak mümkün olur. Bunun dışında her durum için ekserji analizi yapmak mümkün değildir. Kazan için yapılacak detaylı bir ekserji analizi ayrı bir çalışma konusudur. Bu nedenle yanma ürünlerinin, kızdırıcının, ekonomizerin neden olduğu ekserjiler bu çalışmaya içerisine alınmamıştır. Yalnızca döner fırından gelen atık ısının ısı enerjisinin kazan içerisindeki borulardaki suya aktarıldığı kabulü yapılmıştır. Kazana giren ve kazandan çıkan akışkanının kütle miktarının değişmediği kabul edilmiştir. Sürekli akışlı şartlarda bulunan kazanın ekserji dengesi sunulmuştur.

$$E_2 + E_Q = E_3 + I_K \quad (16)$$

$$\varepsilon_2 = (h_2 - T_0 s_2) - (h_0 - T_0 s_0) \quad (17)$$

$$s_0 = (s_{s,0} - s_{f,0}) / s_{sf,0} \quad (18)$$

$$s_2 = (s_{s,2} - s_{f,2}) / s_{sf,2}$$

$$\varepsilon_3 = (h_3 - T_0 s_3) - (h_0 - T_0 s_0)$$

$$s_3 = (s_{s,3} - s_{f,3}) / s_{sf,3}$$

$$E_Q = \dot{m}_S Q_K (1 - T_0 / T_K) \quad (19)$$

$$I_K = \dot{m}_S T_0 ((s_3 - s_2) - Q_K / T_K) \quad (20)$$

3.2.2. Yoğuşturucunun (Kondenser) Ekserji Analizi

Yoğuşturucuya gelen soğutma suyu kütleinin sabit olduğu kabulü yapılmıştır Bu kabul ile ilgili ekserji dengesi;

$$E_4 + E_{ss1} = E_1 + E_{ss2} + I_{Yoğ} \quad (21)$$

$$\varepsilon_1 = (h_1 - T_0 s_1) - (h_0 - T_0 s_0) \quad (22)$$

$$\varepsilon_4 = (h_4 - T_0 s_4) - (h_0 - T_0 s_0)$$

$$\varepsilon_{ss1} = (h_{ss1} - T_0 s_{ss1}) - (h_0 - T_0 s_0)$$

$$\varepsilon_{ss2} = (h_{ss2} - T_0 s_{ss2}) - (h_0 - T_0 s_0)$$

$$I_{Yoğ} = (\dot{m}_s (h_4 - h_1) - \dot{m}_s T_0 (s_4 - s_1) + \dot{m}_{ss} (h_{ss1} - h_{ss2}) - \dot{m}_{ss} T_0 (s_{ss1} - s_{ss2})) \quad (23)$$

3.2.3. Buharlı Güç Çevrimi Toplam Tersinmezlik ve Toplam Verim

Çevrimde bulunan yoğuşturucu ve kazandaki tersinmezlikler elde edildikten sonra sistemin toplam tersinmezliğinin elde edilmesi için aşağıda bulunan formüller kullanılmıştır.

$$I_{Top} = \sum I_{Sistem\ Elemanları} \quad (24)$$

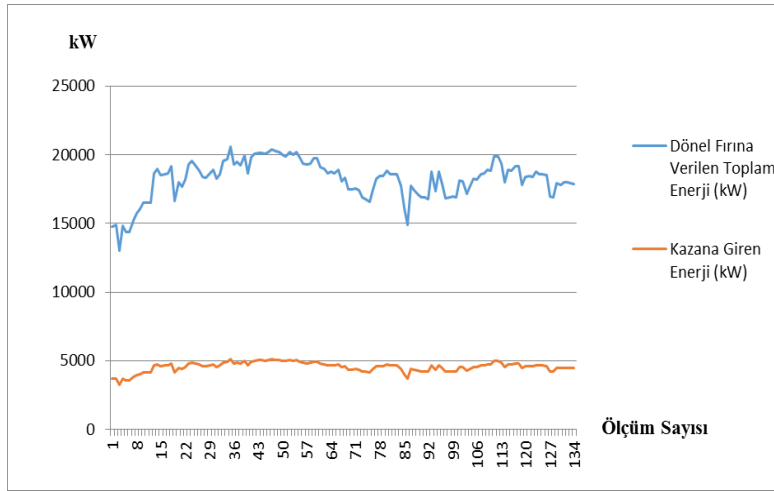
$$I_{Top} = I_K + I_{Yoğ} \quad (25)$$

$$I_{Top} = (\dot{m}_s (h_2-h_3) - \dot{m}_s T_0 (s_2-s_3) + \dot{m}_s (h_4-h_1) - \dot{m}_s T_0 (s_4-s_1) + \dot{m}_{ss} (h_{ss1} - h_{ss2}) - \dot{m}_{ss} T_0 (s_{ss1}-s_{ss2}) + Q_K (1 - T_0/T_K)) \quad (26)$$

Buharlı güç çevriminin çalışmasındaki yapılan kabuller;

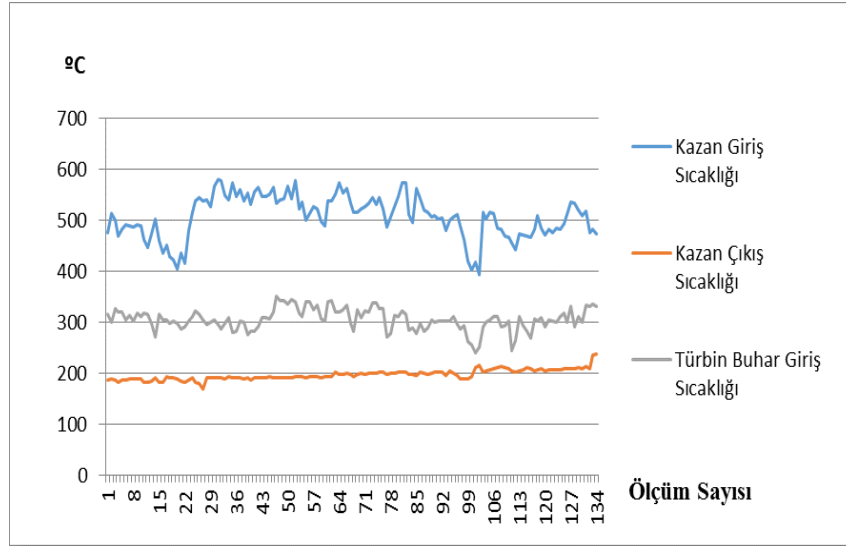
Çalışmada belirtilen kabuller yapılmıştır. Birinci ve ikinci kanun analizleri bu kabuller çerçevesinde yapılmıştır.

- Pompa hattı ve boru hattındaki basınç kayıpları ihmal,
- Pompada adyabatik sıkıştırma,
- Kazana döner fırın haricinde herhangi bir şekilde ısı transferi yoktur,
- Türbinden dış ortama ısı transferi yoktur,
- Türbinde sistemindeki basınç kayıpları ihmal,
- Kazanda ve yoğuşturucuda iş etkileşimi yoktur.



Şekil 3: Döner fırına verilen enerji – Kazana giren enerji

Şekil 3. Enerji grafiğinde görülmekte olan 127 ölçüm neticesinde Döner fırına verilen enerji miktarı ortalama 15000-20000 kW değerleri arasındadır. Bu ölçümlerde 15000 kW altında olan ölçümlerde görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi Döner fırındaki enerjinin %25'i kazana girmektedir.

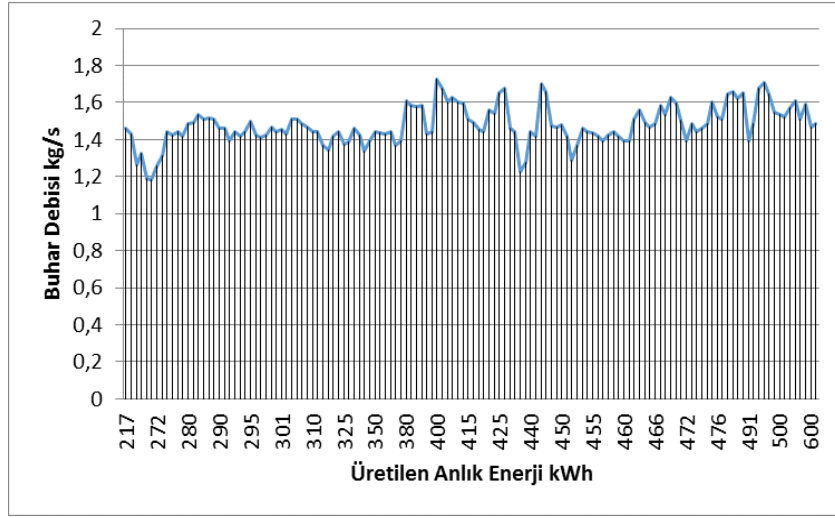


Şekil 4: Sıcaklık grafiği

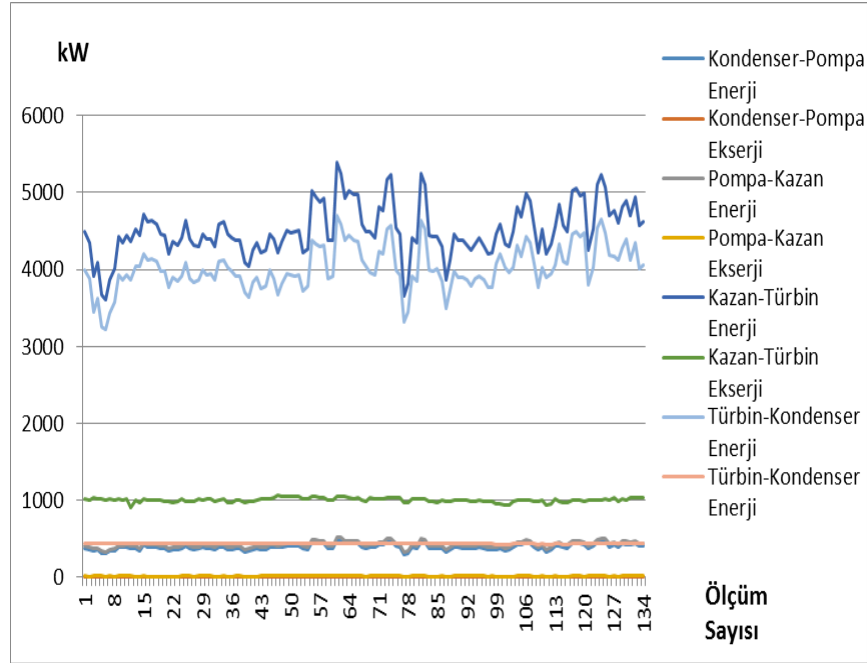
Şekil 4’teki sıcaklık değerleri kazana giriş, kazandan çıkış ve türbine giriş değerlerini göstermektedir. Döner fırından gelen atık ısı 400-580 °C ‘da kazana girer. Yapılan 129 ölçümde en düşük değerler 400 °C olduğu görülmektedir. Kazana giren sıcaklık inişli-çıkışlı bir grafik çizmiştir. Bunun sebebi ise Döner fırında işlenen malzeme yapısı ve çeşitliliğidir. Kazan çıkış sıcaklığı 200-220 °C değerleri arasındadır. Türbine giriş sıcaklığı ise 250-340 °C değerleri arasındadır.

Şekil 5. Buhar debisine karşılık gelen anlık enerji üretimi görülmektedir. Buhar debisi değerleri 4,2 – 6,2 t/h arasındadır. İstenilen 8 t/h değerine ulaşmadığı görülmektedir. Üretilen anlık enerji değerleri 217 – 600 kWh değerleri arasındadır.

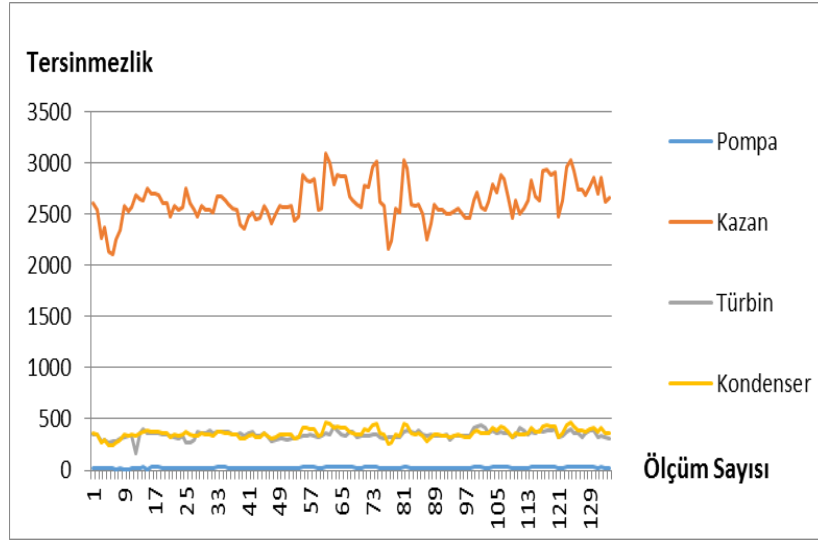
Şekil 6.’da çevrimde bulunan ana kısımlardaki enerji ve ekserji değerleri gösterilmektedir. Ölçüm değerleri ile yapılan analizler sonucunda 1 noktasındaki enerji değeri 320-470 kW, ekserji değeri 8-16 kW aralıklarında, 2 noktasında enerji değeri 325-528 kW, ekserji değeri 13-19 kW aralıklarında, 3 noktasında enerji değeri 3600-5400 kW, ekserji değeri 970-1050 kW aralıklarında, 4 noktasında enerji değeri 3320-4700 kW, ekserji değeri 430-440 kW aralıklarındadır.



Şekil 5: Buhar debisi - Anlık enerji



Şekil 6: Enerji ve ekserji grafiği



Şekil 7: Tersinmezlik grafiği

Şekil 7’de ölçümlerden elde edilen değerler ile yapılan enerji ve ekserji analizi sonucunda pompa, kazan, türbin ve kondenserdeki tersinmezlik değerleri gösterilmektedir. Tersinmezliğin en yüksek olduğu kısım kazandır. Kazandaki tersinmezlik değerleri 2000-3000 değerleri arasında ve sistem yapısı için yüksek olup, türbin ve kondenserde 250-480 aralığında, pompada ise bu değerler 30-50 aralığında makul seviyededir. Sistem istenilen seviyede enerji üretememektedir. Tersinmezlik değerlerinde de anlaşılacağı gibi kazanın yapısı sistem için uygun değildir.

4. EKONOMİK ANALİZ

4.1. Net Bugünkü Değer (NBD)

Projenin ekonomik analizinde kullanılan Net Bugünkü Değer (NBD) yöntemi ekonomik ömür boyunca projedeki net nakit akış girdilerinin yatırım için yapılmış giderlerin kabul edilmiş bir indirgeme oranı ile mevcut güne indirgenen değerleri arasında farkı gösterir.

Bir projenin uygulama kabulü net bugünkü değerın sıfıra eşit veya büyük olmasıyla gerçekleşmesi gerekmektedir. Projelerde net bugünkü değerın büyük olması o projenin öncelikli kabul edilmesi açısından öncelik verilmesini ifade etmektedir.

Çizelge 1: Projenin net bugünkü değer yöntemi ile ekonomik analiz tablosu

KOJENERASYON ÜNİTESİNİN NBD YÖNTEMİ İLE EKONOMİK ANALİZİ (\$)												
		Yıllar										
	Bugün	1	3	5	7	9	10	11	13	15	17	19
Yatırım												
Multistage Turbostage Generatör Seti	-\$285.032,14											
Acil Durum Pompası	-\$4.958,68											
Kontrol Paneli	-\$27.364,55											
Kondenser	-\$79.706,15											
Mühendislik Hizmetleri	-\$7.346,19											
Eğitim ve Devreye Alma	-\$29.017,45											
Nakliye	-\$2.534,44											
Toplam	-\$435.959,60											
İndirilmiş Toplam	-\$407.713,50											
Hurda Maliyeti	-\$40.771,35											
Nakit Akışı												
Elektrik tüketimi (0,1 \$/kWh)	-	-\$20.952,53	-\$24.893,70	-\$29.576,20	-\$35.139,49	-\$41.749,23	-\$45.506,66	-\$49.602,26	-\$58.932,44	-\$70.017,63	-\$83.187,94	-\$98.835,60
Elektrik üretimi (0,1 \$/kWh)	-	\$45.149,66	\$53.642,31	\$63.732,43	\$75.720,50	\$89.963,52	\$98.060,24	\$106.885,66	\$126.990,85	\$150.877,83	\$179.257,95	\$212.976,37
Bakım-Onarım(%2)	-	-\$443,63	-\$525,25	-\$621,87	-\$736,27	-\$871,71	-\$948,51	-\$1.032,08	-\$1.221,94	-\$1.446,73	-\$1.712,87	-\$2.027,97
Toplam Nakit Akışı		\$23.753,49	\$28.223,36	\$33.534,35	\$39.844,74	\$47.342,58	\$51.605,07	\$56.251,33	\$66.836,47	\$79.413,47	\$94.357,13	\$112.112,79
Kümülatif Nakit Akışı	-\$407.713,50	-\$383.960,00	-\$329.844,48	-\$265.545,67	-\$189.147,31	-\$98.372,56	-\$46.767,49	\$9.483,83	\$137.636,21	\$289.903,76	\$470.824,32	\$685.789,64
İskonto Oranı (9,5%)	\$0,37	\$0,33	\$0,28	\$0,24	\$0,19	\$0,16	\$0,15	\$0,14	\$0,11	\$0,10	\$0,08	\$0,07
Bugünkü Değer	-\$366.942,15	\$21.692,69	\$21.496,43	\$21.301,95	\$21.109,22	\$20.918,23	\$20.823,38	\$20.728,96	\$20.541,40	\$20.355,53	\$20.171,34	\$19.988,81
NBD						\$48.722,42						

5. SONUÇ ve TARTIŞMALAR

Ölçüm değerleri ile yapılan enerji-ekserji analizlerinin sonucunda 1 noktasındaki enerji değeri 320-470 kW, ekserji değeri 8-16 kW aralıklarında, 2 noktasında enerji değeri 325-528 kW, ekserji değeri 13-19 kW aralıklarında, 3 noktasında enerji değeri 3600-5400 kW, ekserji değeri 970-1050 kW aralıklarında, 4 noktasında enerji değeri 3320-4700 kW, ekserji değeri 430-440 kW aralıklarındadır. Ölçümlerden elde edilen değerler ile yapılan enerji ve ekserji analizi sonucunda pompa, kazan, türbin ve kondenserdeki tersinmezlik değerleri gösterilmektedir. Tersinmezliğin en yüksek olduğu kısım kazandır. Kazandaki tersinmezlik değerleri 2000-3000 değerleri arasında ve sistem yapısı için yüksek olup, türbin ve kondenserde 250-480 aralığında, pompada ise bu değerler 30-50 aralığında makul seviyededir. Sistem istenilen seviyede enerji üretememektedir. Tersinmezlik değerlerinde de anlaşılacağı gibi kazanın yapısı sistem için uygun değildir.

Hedeflenen elektrik enerjisi değerine ulaşılması için buhar türbinine gelen buharın sıcaklık, debi ve basınç değerlerinin firma taahhüdüne ulaşması gerekmektedir. Atık ısının kazana gelmeden önce döner fırınlardan çıktıktan sonra tozsuzlaştırmaya faydası olması açısından siklon grubuna gelmesi değerlerin yükselmesine yardımcı olacaktır. Atık ısı kazanının yapısı hakkında, kojenerasyon sisteminin çalışma şartlarına

uygunluğu açısından ayrı bir araştırma ve çalışma yapılarak kojenerasyon sistemine uygun hale getirilmesi gerekmektedir.

Sistemden istenilen seviyede verim alınmamasına rağmen mevcut halde yapılan ekonomik analizde sistemin 20 yıllık ömrü olduğu düşünüldüğünde yatırıma değer bir proje olduğu görülmektedir. Atık ısı kazanında yapılacak iyileştirmeler enerji üretim miktarını artırarak, kümülatif nakit akış değerinin pozitif duruma daha erken yıllarda gelmesini sağlayacaktır.

Bu çalışmada kojenerasyon ünitesinin yatırım için taahhüt edilen değerlere ulaşmaması nedeniyle beklenen verimin altında çalıştığı görülmektedir. Atık ısı kazanının yapısı sistemle uyumlu çalışmamaktadır. Kazanın yetersizliği istenilen elektrik üretimine ulaşmakta zorluk çıkarmaktadır. Döner fırından gelen atık ısı manyezitin içeriğinden dolayı toz partiküllerini kazana taşımaktadır. Bu durum kazan boru demetlerindeki ısı transferinde olumsuz durumlara sebep olmaktadır. Hesaplamalarda tersinmezlik değerleri karşılaştırıldığında en yüksek değer kazan sisteminde olduğu görülmektedir. Ekserji hesaplamaları göz önüne alındığında tersinmezlik değerlerinin en büyük olduğu çevrim elemanının kazan olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmanın sonuçları atık ısı kazanı kojenerasyon sistemine uyumlu çalışmadığı ve ayrı bir çalışma yapılarak detaylı incelenmesi gerektiği ortaya koymaktadır.

Net bugünkü değer yöntemi ile hazırlanan ekonomik analiz tablosunda görüldüğü gibi kümülatif nakit akış değeri 10. ve 11. Yıllar arasında pozitif geçmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

S.G.T.: Yöntem, doğrulama, analiz, araştırma, veri alma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

A.A.: Kavramsallaştırma, yöntem, doğrulama, araştırma, kaynaklar, gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

Altınkaynak, M. (2012). *Çimento Fabrikalarında Kullanılan Döner Fırının Termodinamik*. Süleyman Demirel Üniversitesi Enerji Sistemleri ABD.

Ballı, Ö. (2008). *Kojenerasyon sistemlerinin enerji, Kullanılabilirlik (ekserji) ve Ekserjiekonomik Analiz Yöntemleri Kullanılarak Performansının Değerlendirilmesi*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.

Bejan, A. (1996). *Street Network Theory of Organization in Nature*. Journal of Advanced Transportation.

Bejan, A. (1997). *Advanced Engineering Thermodynamics*. New York: Jhon Wiley and Sons.

- Bilginsoy, A. K. (2012). *Bir Termik Santralde Termodinamik Analiz ve Isıl Süreçlerdeki Tersinmezliklerin Belirlenmesi*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans.
- Cziesla, F., Tsatsaronis, G., & Zengliang, G. (2005). *Avoidable thermodynamic inefficiencies and costs in an externally fired combined cycle power plant*. Energy.
- Çengel, Y., Boles, M., & Kanoğlu, M. (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. Mc Graw Hill.
- Dikili, K. (2019). *Atık Isı Kazanlı Gaz-Buhar Çevrimli Güç Santralinin Ekserji Analizi*. Zonguldak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Diñçer, İ. (2002). *The Role of Exergy in Energy Policy Making*. Energy Policy.
- Diñçer, İ., & Rosen, M. (2003). *Thermoeconomic Analysis Of Power Plants*. Energy Conversion and Management.
- El-Masri, M. (1997). *Exergy analysis of combined cycles: Part 1 – Air cooled Brayton cycle gas turbine*. ASME J. Eng. Gas Turbine Power.
- Erdoğan, M. (2023). *Endüstriyel Bisküvi Fırınının Termodinamik, Maliyet Analizi Ve Atık Isı Geri Kazanımı*. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Ersayın, E. (2020). *Atık Isı Geri Kazanımında Yeni Tekniklerin Modellenmesi*. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gürtürk, M. (2015). *Alçı Üretimi Yapan Bir Tesisin Enerji Ekserji ve Eksergoekonomik Analiz Yöntemiyle Performansının Değerlendirilmesi*. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.
- Güven, H., Ekmekçi, İ., & Çiçek, A. (2003). *Bir Sanayi Tesisinde Kojenerasyon Ve Atık Isı Geri Kazanımının İncelenmesi*. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.
- Horlock, J. (1995). *Combined power plants-past, present and future*. Gas Turbines Power .
- Karamarkovic, V., Marasevic, M., & Karamarkovic, R. (2013). *Recuperator for waste heat recovery from rotary kilns*. Applied Thermal Engineering.
- Karanfil, G., Rüşen, S. E., Poyraz, Ş., & Güler, M. (2020). *Atık Isı Geri Kazanım Sistemleri Ve Isıl Verim Parametrelerinin Deneysel İncelenmesi*. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi.
- Kolay, E. (2004). *Kojenerasyon Sistemlerinde Atık Isı Kullanımı Ve Bir Uygulama Örneği*. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kuvel, A. (2005). *Baca Gazlarından Atık Isı Geri Kazanımının Deneysel Olarak İncelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Memiş, O. (2019). *Çimento Sektöründe Atık Isı Geri Kazanım (WHR) Sisteminin Ekserji ve Enerji Analizi*. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Mühendisliği İşletim ve Teknolojileri Anabilim Dalı.
- Mert, M. S. (2010). *Bir Güç Santralinin Ekserjik ve Termoekonomik Analizi*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.
- Rant, Z. (1964). *Exergie and Anergie*. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden.
- Shrikant, K., & Chaube, A. (2013). *Exergy Analysis of Birla Cement Plant Satna*. International Journal of Scientific & Engineering Research.
- Şahin, H. E. (2012). *Kritik-Üstü Tip Bir Buharlı Güç Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Tarakçıoğlu, A. (2006). *Sanayide Atık Isıdan Yararlanma Yöntemleri*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Terhan, M., Özağdaş, E., & Omar, M. (2023). *Ekonomizer, Yoğuşmalı Ekonomizer Ve Hava Ön Isıtıcı Tasarımları İle Atık Isı Geri Kazanımının Enerji Ve Ekonomik Değerlendirilmesi*. Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dergisi.

Tunca, S. G. (2015). *Sinter Manyezit Üretimi Dönel Fırınlarındaki Atık Isının Elektrik Üretiminde Değerlendirilmesi*. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Tütüncü, G., & Özgener, Ö. (2016). *Çimento Sektöründe Atık Isı Geri Kazanım (WHR) Sisteminin Termodinamik İncelenmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi.

Variyenli, H., & Göktekin, K. (2018). *Hermetik Gaz Yakıcı Cihazlardaki Atık Isı Enerjisinin Elektrik Enerjisine Dönüştürülmesi*. Politeknik Dergisi.

Wall, G., & Gong, M. (2001). *On Exergy And Sustainable Development – Part 1: Conditions And Concepts*. Exergy, An International Journal.

Yazıcı, H., & Selbaş, R. (2011). *Bir Buharlı Güç Santralinin Enerji Ve Ekserji Analizi*. Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi, Cilt 10, Sayı 1.

Sesaltı Rüzgâr Tünelinde Kanat Aerodinamiği Kuvvet ve Akış Görüntüleme Analizleri

Samet Giray Tunca^{1*}, Mustafa Arif Özgür²

¹ Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, 43000

² Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, 43000

Geliş: 15.11.2023, Kabul: 27.11.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

ÖZ

Aerodinamik ölçümler kanat profillerinin karakteristik yapılarını belirlemek için yapılır. Bu ölçümler kanadın yapısını optimize etmek için kullanılır. Kanat profillerinin kalkış, uçuş ve iniş durumlarındaki durumunu incelemek için kaldırma katsayısı değerleri göz önünde bulundurulur.

Bu çalışmada kanat aerodinamiği çalışması ile sesaltı rüzgâr tünelinin akış doğrulama çalışması yapılmıştır. Sesaltı rüzgâr tüneline NACA0015 kanat profili incelenmiştir. Test odasına kuvvet sensörü yerleştirilerek kanat profili analizi yapılmıştır. Sesaltı rüzgâr tüneline bal peteği, akış fileleri, daralma konisi, test bölmesi, difüzör ve emiş motoru bölümleri bulunmaktadır. Test bölmesi 50x50 cm olan sesaltı rüzgâr tüneline kullanılan model 3d yazıcı yöntemi ile imal edilmiştir. Kaldırma ve sürükleme kuvveti ölçümleri 6×10^4 , 8×10^4 ve 10×10^4 Reynolds sayısı (Re) değerlerinde çalışılmıştır. Ölçümler hücum açısının 0° den başlayarak iki derecelik artışlarla analiz edilmiştir. Konumlanmanın test odasının içinde olacak şekilde farklı Re sayılarında yapılan ölçümler neticesinde yaklaşık olarak 9 ve 10 derecelik açılarda tutunma kaybının başladığı gözlemlenmiştir.

Direnç teli ile yapılan akış görüntüleme sistemi rüzgâr tüneline test bölmesinde duman akışı oluşturulmuştur ve akış ayrışması bu yöntem ile görüntülenmiştir. Akış görüntüleme deneyi 6 m/s hızda 6×10^4 Re sayısında gerçekleştirilmiştir. Yüksek Re sayılarında akış görüntüleme deneylerinden sonuç almak için Re formülündeki değişkenleri düzenlemek gerekmektedir. Çalışılan kanadın veter uzunluğu değiştirildiğinde Re sayısı da değişecektir.

Yapılan çalışmalar neticesinde kaldırma kuvveti değerleri ve akış görüntüleme ile elde edilen duman görüntüsünde tutunma kaybı derecelerinin birbiri ile örtüştüğü anlaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Rüzgâr tüneli; tutunma kaybı; kanat profili; kaldırma katsayısı; akış görüntüleme

Wing Aerodynamics Force and Flow Imaging Analyzes in Subsonic Wind Tunnel

ABSTRACT

Aerodynamic measurements are made to determine the characteristic structures of airfoils. These measurements are used to optimize the structure of the wing. Lift coefficient values are taken into consideration to examine the condition of the wing profiles during takeoff, flight and landing.

In this study, wing aerodynamics study and flow verification study of subsonic wind tunnel were carried out. The NACA0015 airfoil was examined in the subsonic wind tunnel. Airfoil profile analysis was

performed by placing a force sensor in the test chamber. There are honeycomb, flow nets, constriction cone, test chamber, diffuser and suction motor sections in the subsonic wind tunnel. The model used in the subsonic wind tunnel with a 50x50 cm test chamber was manufactured using the 3D printer method. Lift and drag force measurements were studied at Reynolds number (Re) values of 6×10^4 , 8×10^4 and 10×10^4 . Measurements were analyzed in two-degree increments of the angle of attack, starting from 0° . As a result of the measurements made at different Re numbers, with the positioning inside the test chamber, it was observed that adhesion loss started at angles of approximately 9 and 10 degrees.

Smoke flow was created in the wind tunnel test chamber of the flow imaging system made with resistance wire and flow separation was visualized with this method. The flow imaging experiment was carried out at a speed of 6 m/s and a Re number of 6×10^4 . In order to get results from flow imaging experiments at high Re numbers, it is necessary to arrange the variables in the Re formula. When the chord length of the studied wing is changed, the Re number will also change.

As a result of the studies, it was understood that the lift force values and the stall degrees in the smoke image obtained by flow imaging overlapped with each other.

Keywords: Wind tunnel; stall; airfoil; lift coefficient; flow imaging

1. GİRİŞ

Aerodinamik ölçümler kanat profillerinin karakteristik yapılarını belirlemek için yapılır. Bu ölçümler kanadın yapısını optimize etmek için kullanılır. Kanat profillerinin kalkış, uçuş ve iniş durumlarındaki durumunu incelemek için kaldırma katsayısı değerleri göz önünde bulundurulur. Farklı açılarda yapılan çalışmalar ile karşılaştırmalar yapılarak kanat profil yapı değerlendirilir. Literatürde kanat profillerinin incelendiği bir çok aerodinamik ölçümler yapılan çalışmalar bulunmaktadır.

Akış görüntüleme yöntemlerinden olan duman teli deneyleri rüzgâr tünellerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem rüzgâr akışının geldiği yönde test bölmesinin ön tarafında yukarıdan aşağıya gerilmiş bir direnç teli kullanılarak belirli bir volt akım sayesinde duman akış çizgilerini oluşturmakta, akışı karakteristiğini ortaya koymaktadır. Duman eldesi birçok şekilde gerçekleştirilebilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus akışı engellemeyecek şekilde bir tasarım yapılmasıdır. Aksi durumda kalınlığı fazla gelen duman teli akışı türbülanslı hale getirerek bozabilir (Kazemi, Ahmadabadi, Sedaghat, & Saghafian, 2016) (Genç, Özışık, & Kahraman, 2008) (Barlow, Harper, & Pope, 1999).

Yapılan projede geometrileri farklı kesitlerin uzun açıklıklı köprülerde aerodinamik açıdan yapılarının tespiti için deneysel ve sayısal analizler yapılmıştır (Uzol & Kurç, 2012).

Koca M.S. tarafından yapılan tez çalışmasında su tüneli kullanılmıştır. Akış analizlerinin gerçekleştirileceği model üzerine robotik olarak hareket kazandırabilen kuvvet cihazının tasarım çalışması yapılmıştır. Bu cihaz yunuslama, eksenel ve yalpa hareketlerini gerçekleştirebilmektedir. Sürecin robotik hareket düzeneğine bağlı altı eksenli, dış, denge düzeneği ile statik, dinamik ve adım tarama deneylerinin aerodinamik kuvvet ölçümü ve uçuş benzetimi başlıkları altında gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir (Koca, 2019).

Kanat aerodinamiği çalışan Önen B. yaptığı çalışmada NACA 4412 kanat profilinin çeşitli hücum açılarında elde ettiği kaldırma ve sürüklenme katsayısı sonuçlarını literatürle karşılaştırılmıştır (Önen, 2011). M.Kaya tarafından yapılan çalışmada elde edilen verilerin literatürde yapılan NACA testleriyle örtüştüğü görülmüştür (Kaya, 2014). Miklosevic düşük hızlı bir rüzgâr tüneline aerodinamik kuvvet hesaplamalarını 505.000 ve 520.000 aralığındaki Reynolds sayılarında ve -2° ile 20° aralığında değişen hücum açılarında çalışmıştır (Miklosevic, Murray, Howle, & Fish, 2004).

CHANGE projesi ile kanat profilini farklı uçuş fazlarında sürekli olarak aerodinamik verimlilik sağlayabilmektir (Arslan, ve diğerleri, 2015).

Bununla birlikte H. Hamdani ve M. Sun (2000) NACA0012 kanat yapısı çalışmalarında düşük Re sayılarında ani hızlanmalar büyük aerodinamik kuvvetlerin oluşmasına neden olduğu tespit edilmiştir. (Hamdani & Sun, 2000).

NACA kanatları ile çalışma yapan M. A. Özdemir ve S. Onbaşıoğlu (2004), 0, 2, 4, 6 ve 8° lik hücum açılarında yaptıkları çalışmayı NACA (2003) tarafından rüzgâr tünelleri kullanılarak elde edilen deneysel verilerle karşılaştırmışlar (Özdemir & Onbaşı, 2004).

Göv İ. ve diğ. çalışmalarında NACA 4412 kanat profili üzerinde çalışarak iki farklı kanat profili daha elde etmişlerdir. Çalışmalarında üç kanat yapısı için 0° ile 23° arasındaki hücum açılarında aerodinamik performans analizleri yapılmışlardır (Göv, Doğru, & Korkmaz, 2019).

Yapılan diğer bir aerodinamik çalışmada ürettikleri kanat yapısının aerodinamik performanslarını sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Duman görüntüleme deneyleri, kanat yapısı üzerindeki ayrılma ve durma noktalarını belirlemek için küçük boyutlu bir rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. Ürettikleri profil yapısına temel olarak kabul ettikleri NACA0021 kanat yapısına kıyasla kaldırma/sürükleme oranının yaklaşık olarak 2,9 kat yükseldiğini söylemişlerdir (Kazemi, Ahmadabadi, Sedaghat, & Saghafian, 2016).

Tanürün ve diğ. çalışmalarında NACA0018 kanat yapısının aerodinamik performansı deneysel sonuçlarını yeni tasarladıkları iki kanat yapısı ile karşılaştırmışlardır. Yeni tasarlanan AR1 ve AR2 kanat yapılarının aerodinamik deneysel sonuçlarında CL değerlerinde %0,41 ve %2,71 oranında iyileşme sağlanmıştır (Tanürün, Ata, Canlı, & Acır, 2020).

Deneysel ve sayısal yöntem için Rubel ve diğ. NACA 0015 kanat profilinin aerodinamik özelliklerinin sapmasını ve doğrulanmasını yapmışlardır. Reynolds sayı kaldırma katsayısının artmasıyla biraz artar ve belli bir noktadan sonra azalır. Azaldığı kısımda kanat profili üzerinde büyük negatif basınç oluşmaktadır (Rubel, Uddin, Islam, & Rokunuzzaman, 2016)

Rüzgâr tüneline yapılacak olan deneysel çalışmaların başlangıcı literatürde değerleri bulunan bir kanat profili ile yapılması düşünülmüştür. NACA0015 kanat profili imal edilmesi ve literatür karşılaştırılması bakımından tercih edilmiştir. Deneylerin yapılacağı ortamda bazı kabuller yapılmıştır; hava sıcaklığı 20°C, havanın kinematik viskozitesi 1.5111 e-5 m²/s kabul edilmiş ve olarak kanat profili veter uzunluğu 0,15 m'dir. Testler 6 x 10⁴, 8 x 10⁴ ve 10 x 10⁴ Re sayılarında gerçekleştirilmiştir (Tunca & Özgür, 2023).

2. EŞİTLİKLER

Sesaltı terimi ise Mach sayısı ile ifade edilmektedir. Mach sayısı, akışkanlar mekaniğinde hareket halindeki bir kütlenin hızının, kütlenin bulunduğu şartlardaki ses hızına oranıdır. V (m/s) hareket halinde kütlenin hızını, c (m/s) ses hızını ifade etmektedir.

$$Ma=V/c \quad (1)$$

V (m/s) hareket halinde kütlenin hızını, c (m/s) ses hızını ifade etmektedir. Mach sayısı 0,8 değerinden küçük olduğu durumlar sesaltı olarak adlandırılır.

Kaldırma kuvveti akışa dik yönde cisme etkimektedir.

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho A V^2 \quad (2)$$

C_L boyutsuz kaldırma kuvveti katsayısını, ρ (kg/m^3) havanın yoğunluğunu, A (m^2) rüzgârın kanat üzerindeki etki alanını, V (m/s) rüzgâr hızını ifade etmektedir.

Sürüklenme kuvveti akışa paralel yönde cisme etki etmektedir.

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho A V^2 \quad (3)$$

C_D boyutsuz sürüklenme kuvveti katsayısını, ρ (kg/m^3) havanın yoğunluğunu, A (m^2) rüzgârın kanat üzerindeki etki alanını, V (m/s) rüzgâr hızını ifade etmektedir.

$$Re = \frac{(v.d.\rho)}{\mu} \quad (4)$$

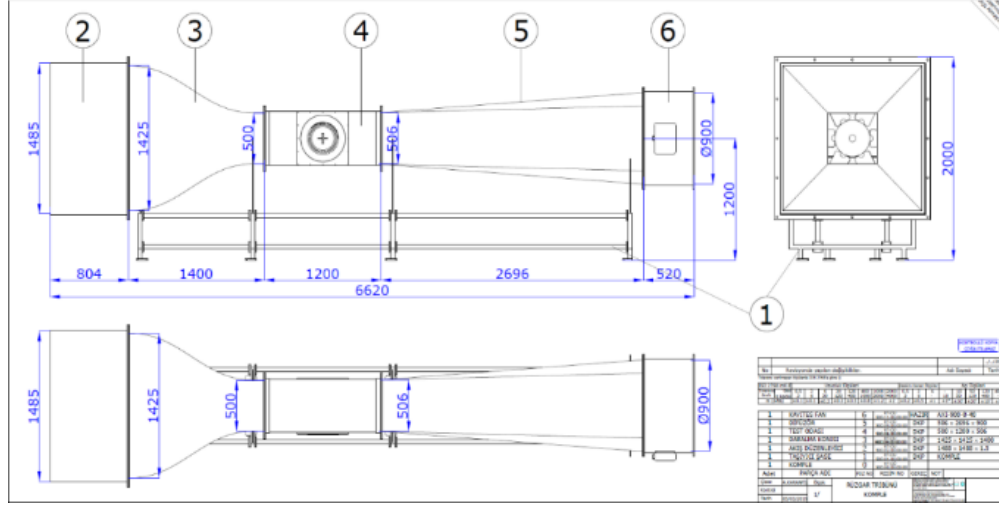
Çalışmaların yapıldığı rüzgâr tünelinde belli bir hıza kadar testler yapılabilmektedir. Testlerin yapıldığı hız değerlerinde Denklem 1'e göre Ma sayısı 0,8'in altında kalmaktadır. Bu Ma değeri rüzgâr tünelinin sesaltı olduğunu ifade etmektedir.

Rüzgâr tüneli test bölümünde bulunan balans kuvvet cihazındaki sensörler sayesinde verileri bilgisayara aktarmaktadır. Gelen veriler Newton (N) birimindedir. Denklem 2 ifadesinde kaldırma katsayısı (C_L) görülmektedir. Çalışmalarımızdaki karşılaştırma ve grafiklerde C_L değerleri kullanılmaktadır.

Akışkanın belirli şartlardaki davranışlarını anlamak için Denklem 4'te matematiksel formülü bulunan Reynolds(Re) sayısı kullanılır. Testlerde akış şartlarını aynı kanat veter uzunluğunda farklı hızlarda belirledik. 6,8,10 m/s hızlarda yapılan ölçümlerle çalışmalarımızı tamamladık.

3. MATERYAL VE METOT

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında Şekil 1'de teknik resmi görülen Sesaltı rüzgâr tüneli açık sistem bir rüzgâr tüneli olup 50x50 cm test bölümüne sahiptir. Çalışmamızda kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti değerleri kuvvet cihazının test bölümünün içine yerleştirilerek elde edilmiştir. Sistemimizde Şekil 2'de bazı kısımları görülen bal peteği, elekler, kollektör, test odası ve difüzör bölümleri bulunmaktadır.



Şekil 1: Sesaltı rüzgâr tüneli tasarımı.



Şekil 2: Sesaltı rüzgâr tüneli.

3.1. Kuvvet-Balans Sistemi

Kanat profilleri aerodinamik kuvvetler açısından incelendiğinde karşımıza tutunma kaybı kavramı çıkar. Kanat profili kaldırma kuvveti değerleri belli bir açıya kadar yükseldikten sonra kanadın üst yüzeyindeki sınır tabaka ayrılmaları ile değerler düşüşe geçer. Bu durum tutunma kaybı (tutunma kaybı) ile sonuçlanır.

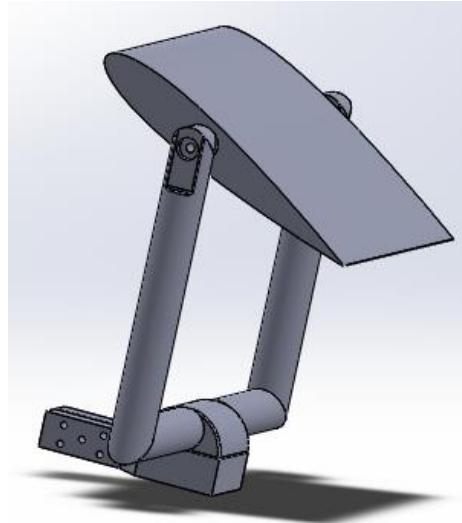
Sesaltı rüzgâr tüneli kuvvet balans sistemi ile yapılan kaldırma kuvveti ölçümlerinde NACA0015 kanat profili kullanıldı. Kanat profili solidworks programında tasarımı yapılarak 3d yazıcıda test edilecek kanat yapısı elde edilmiştir. Kuvvet sistemi ile kanat profili arasında bağlantı elemanları da 3d yazıcı ile elde edilmiştir. Titreşim oluşmasından dolayı metal bağlantı elemanı da ölçümlerde denenmiştir.



Şekil 3: Test bölümünde kuvvet ölçüm cihazına bağlı olan 3d yöntemi ile baskısı alınan NACA0015 kanat profili.

Şekil 3'te görüldüğü gibi rüzgâr tüneli test bölümünde kaldırma kuvveti değerleri alınmıştır. Çalışmalar 6, 8 ve 10 m/s hızlarda, 0° - 16° derece aralığında 2° 'lik artışlar yapılarak gerçekleştirilmiştir. Testlerde kullanılan NACA0015 kanat profili veter uzunluğu 150 mm. olarak imal edilmiştir.

Bu çalışmada uygulanan yöntemde kuvvet cihazı test bölümünün iç tabanına sabitlenmiştir. Şekil 4'de görüldüğü gibi kanat cihaz bağlantı tasarımı yapılmıştır. Bu yöntemle elde edilen kaldırma kuvveti katsayı verileri ve tutunma kaybı 'a girdiği değerler Tablo 1'de verilmiştir. Değerlerin literatür çalışmaları ile örtüşmesine rağmen kaldırma kuvveti değerlerinde kayıplar olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4: Kanat profilinin altına konumlandırılmış kuvvet cihazı, kanat modeli ve bağlantısı.

3.2. Akış Görüntüleme Yöntemi

Rüzgâr tüneli test bölmesine akışın geldiği tarafta direnç üst ve alt noktalara sabitlenmiş bir direnç teli bağlanmıştır. Direnç teline üst kısımdan sıvı parafin damlatılmıştır. Sıvı parafin tel yüzeyini kapladığı anlaşıldığında güç kaynağından yaklaşık 30 volt elektrik gerilimi verilmiş ve tel yüzeyindeki parafin telin ısınması ile yanarak beyaz bir duman oluşturmuştur. Rüzgâr tünelinin akış hızı yönünde duman ilerleyerek kanat profili üzerinde bir hız sınır tabaka meydana getirmiştir.

Rüzgâr hızı 6 m/s ayarlanmıştır. Re sayısı yaklaşık 6×10^4 'te akış görüntüleme deneyi gerçekleştirilmiştir.

4. SONUÇLAR

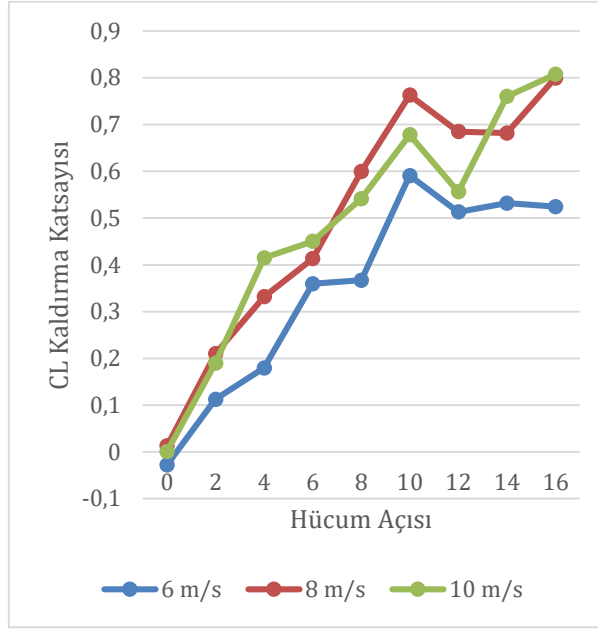
Rüzgâr tüneli test odası içinde modelin altından yapılan bağlantıda Şekil 5 de görüldüğü gibi tutunma kaybı tespit edilmiştir. Kaldırma katsayısı değerleri ile yapılan akış görüntüleme sonuçları karşılaştırıldığında birbiri ile örtüştüğü tespit edilmiştir.

Çizelge 1: Kaldırma katsayısı değerleri (CL)

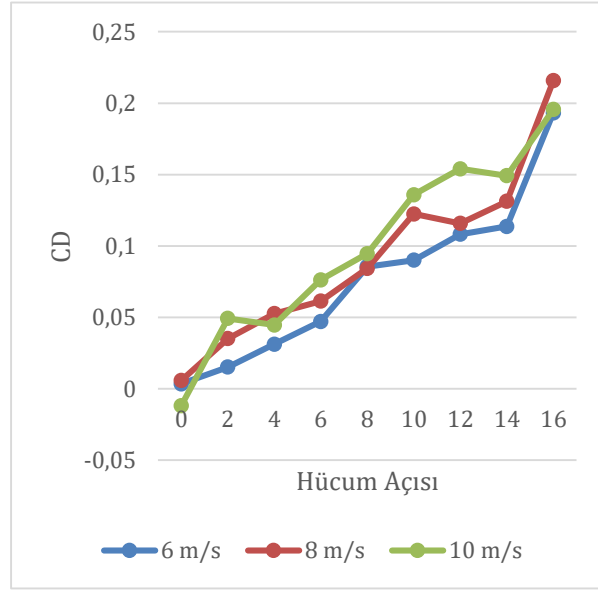
Hücum Açısı	Kaldırma Katsayısı CL (6 m/s)	Kaldırma Katsayısı CL (8 m/s)	Kaldırma Katsayısı CL (10 m/s)
0	-0,02764	0,001	0,0131
2	0,112715	0,19	0,21
4	0,17957	0,414905	0,33161
6	0,359317	0,45	0,41313
8	0,367	0,541593	0,599699
10	0,590638	0,677717	0,762616
12	0,512975	0,55616	0,684795
14	0,531873	0,76002	0,68151
16	0,5244	0,807207	0,799447

Tablo 1 'de kaldırma katsayısı değerleri 0'dan 16⁰ derecelik hücum açılara kadar verilmiştir. Bu ölçümler 6,8 ve 10 m/s'lik hızlarda yapılmıştır.

Akış 10⁰'ye kadar lineer bir artış olduğu ve bu dereceden sonra kanat profilinin tutunma kaybına maruz kaldığı görülmektedir. Sürükleme katsayısının hücum açısı arttıkça arttığı tespit edilmiştir (Şekil 6'ya bakınız)

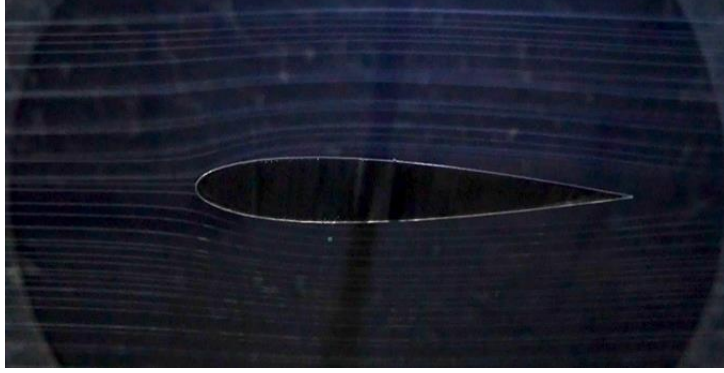


Şekil 5: Kaldırma katsayısı (CL) ve Hücüm açısı grafiği.



Şekil 6: Sürüklenme katsayısı (CD) ve Hücüm açısı grafiği.

Yapılan akış görüntüleme deneylerinde 9-10 derece aralığında tutunma kaybı görülmüştür. Deneyler 6/m'lik hızda yapılmıştır. Duman testlerindeki tutunma kaybı açısı ile kaldırma kuvveti testlerindeki tutunma kaybı açılarının örtüştüğü anlaşılmıştır. Bu deneyler neticesinde rüzgâr tünelinin çalışılan hızlardaki akışının laminer bir akış olduğu belirlenmiştir. Tutunma kaybı açısından yüksek açılarda kuvvet verilerinin düzensizleştiği görülmektedir. Bu durum türbülansın artması ile açıklanabilir.



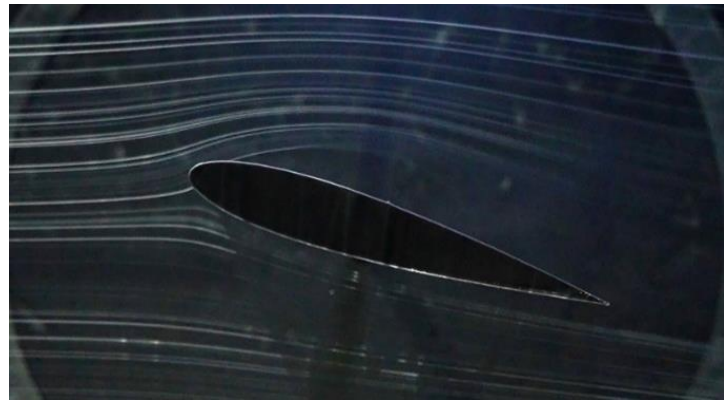
Şekil 7: Akış görüntüleme deneyleri 0 derece.

Akış görüntüleme yöntemi için geliştirilen duman sistemi ile laminar akış olduğu görülmektedir (Şekil 7).



Şekil 8: Akış görüntüleme deneyleri 9 derece.

Dumanın 9 derecenin biraz üzerindeki açıda kanat yüzeyinden ayrılmaya başladığı ve hız sınır tabakanın oluştuğu görülmektedir (Şekil 8).



Şekil 9: Akış görüntüleme deneyleri 17 derece (tutunma kaybı görüntüsü).

Şekil 9’da olduğu gibi tutunma kaybı açısından daha yüksek açılarda kanat yüzeyinde ayrışmanın daha net görüldüğü tespit edilmiştir.

Kuvvet değerleri için kullanılan bağlantı yönteminin çalışması gerektiği görülmektedir. Elde edilen sonuç üzerinden çalışmalar devam edilerek iyileştirme çalışmalarının gerekliliği tespit edilmiştir. Kuvvet kayıpları yeni bağlantı tasarımları ile giderilebileceği anlaşılmıştır.

Duman görüntüleme (akış görüntüleme) düzeneği iyileştirilerek daha ideal görüntüler elde edilebilir. 6 m/s hızların üzerinde duman görüntüsü almak mevcut sistemde zor olmasından dolayı, daha yoğun bir duman elde edilebilecek bir sistem tasarım çalışması yapılmalıdır. Viter uzunluğu değiştirilerek yüksek Re sayılarında çalışmaların yapılabilmesi unutulmamalıdır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

S.G.T.: Yöntem, doğrulama, analiz, araştırma, veri alma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

M.A.Ö.: Kavramsallaştırma, yöntem, doğrulama, araştırma, kaynaklar, gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

Arslan, P., Kalkan, U., Tıraş, H., Tunçöz, İ., Yang, Y., Gürses, E., Yaman, Y. (2015). *Bir Hibrit Firar Kenarı Kontrol Yüzeyinin Tasarımı Ve Analizi*. TMMOB Makina Mühendisleri Odası VIII. Ulusal Uçak, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı.

Barlow, J., Harper, W., & Pope, A. (1999). *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. Jhon Wiley & Sons. Inc.

Genç, S., Özışık, G., & Kahraman, N. (2008). *Düz Flapli NACA0012 Kanat Profilinin Aerodinamik Performansının İncelenmesi*. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi.

Göv, İ., Doğru, M., & Korkmaz, Ü. (2019). *Improvement of the aerodynamic performance of NACA 4412 using the adjustable airfoil profile during the flight*. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi.

Hamdani, H., & Sun, M. (2000). *Aerodynamic forces and flow structures of an airfoil in some unsteady motions at small Reynolds number*. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration.

Kaya, M. (2014). *Airfoil Yapının Yakın Çevresindeki Hız Ve Basınç Dağılımının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi İle İncelenmesi*. Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.

Kazemi, S., Ahmadabadi, M., Sedaghat, A., & Saghafian, M. (2016). *Aerodynamic performance of a circulating airfoil section for Magnus systems via numerical simulation and flow visualization*. Energy 104.

Koca, M. S. (2019). *Su tünellerinde model hareket kontrolü ve senkron aerodinamik kuvvet ölçüm sistemi tasarımı*. Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Miklosovic, D., Murray, M., Howle, L., & Fish, F. (2004). *Leading-edge tubercles delay tutunma kaybı on humpback whale (Megaptera novaeangliae) flippers*. Physics of Fluids.

- Önen, B. (2011). *Bir Ses Altı Rüzgâr Tünelinin Performansının Ve Bazı Modeller Üzerindeki Akışın Deneysel Ve Bilgisayar Destekli Analizi*. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Özdemir, M., & Onbaşı, S. (2004). *F-4 Phantom II Uçağının Etrafındaki Akışın H.A.D. Analizi Kısım 1: Kanat Kök Profili NACA 0006*. HAVACILIK VE UZAY TEKNOLOJİLERİ DERGİSİ.
- Rubel, R., Uddin, K., Islam, Z., & Rokunuzzaman, M. (2016). *Numerical and Experimental Investigation of Aerodynamics Characteristics of NACA 0015 Aerofoil*. International Journal of Engineering Technologies.
- Tanürün, H., Ata, İ., Canlı, M., & Acır, A. (2020). *Farklı açıklık oranlarındaki NACA-0018 rüzgâr türbini kanat modeli performansının sayısal ve deneysel incelenmesi*. Politeknik Dergisi.
- Tunca, S., & Özgür, M. (2023). *Sesaltı Rüzgâr Tünelinde Naca0015 Kanat Profilinin Kuvvet Ve Akış Görüntüleme Yöntemi ile Analizi*. Global Conference on Engineering Research.
- Uzol, O., & Kurç, Ö. (2012). *Uzun Açıklıklı Köprü Kesitlerinin Rüzgâr Altındaki Davranışının Analitik ve Deneysel İncelenmesi*. ODTÜ Mühendislik Fakültesi.

Balastlı Demiryolu Hatlarının Statik Analizinde Diferansiyel Dönüşüm Yönteminin Uygulanması

İlker Şahinoğlu^{1*}, Kanat Burak Bozdoğan²

¹*İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye*

²*İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye*

Geliş: 29.11.2023, Kabul: 27.12.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

ÖZ

Mühendislikte birçok problem belirli kabuller altında basitleştirilmekte ve basitleştirilmiş modelin matematik modeli kurularak analitik ya da sayısal yöntemler ile çözüme ulaşılmaktadır. Bu basitleştirilmiş modellerden birisi de elastik zemine oturan kiriş teorisidir. Elastik zemine oturan kiriş teorisi demiryolu hatlarının çözümünde kullanılan ve uygun sonuçlar veren bir yaklaşımdır. Elastik zemine oturan kiriş problemlerinin modellenmesinde kullanılan en basit yaklaşım ise zeminin kirişe etkisini tek bir parametre ile temsil eden Winkler zemin modelidir. Bu çalışmada balastlı demiryolu hatlarının statik analizi için diferansiyel dönüşüm yöntemi yaklaşımı önerilmiştir. Çalışmada balastlı demiryolu hattı literatürden bilinen Winkler zeminine oturan bir Euler-Bernoulli kirişi olarak modellenmiştir. Önce eşdeğer Winkler zeminine oturan kirişin diferansiyel denklemi ve sınır koşulları yazılmış daha sonra çözümü kolaylaştırmak için diferansiyel denklem ve sınır koşulları boyutsuz hale getirilmiştir. Boyutsuz dördüncü mertebeden adi diferansiyel denklemin çözümü sınır koşulları dikkate alınarak diferansiyel dönüşüm yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda diferansiyel dönüşüm yöntemi ile çözümün uygunluğunu araştırmak üzere literatürden alınan bir örnek çözülmüş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Balastlı demiryolu hattı; Winkler zemin modeli; Diferansiyel dönüşüm yöntemi; Statik analiz

Application of the Differential Transform Method in Static Analysis of Ballasted Railway Tracks

ABSTRACT

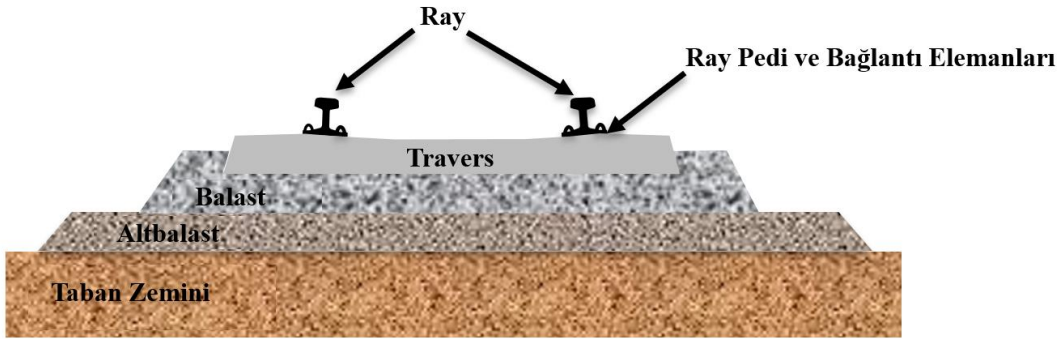
Many problems in engineering are simplified under certain assumptions and a mathematical model of the simplified model is created and the solution is reached using analytical or numerical methods. One of these simplified models is the theory of beams resting on elastic foundations. Beam theory resting on elastic foundation is an approach used in the solution of railway track and gives suitable results. The simplest approach used in modeling problems of beams resting on elastic foundations is the Winkler soil model, which represents the effect of the soil on the beam with a single parameter. In this study, the differential transformation method approach is proposed for the static analysis of ballasted railway track. In the study, the ballasted railway track was modeled as an Euler-Bernoulli beam resting on the Winkler foundation, known from the literature. First, the differential equation and boundary conditions of the beam resting on the equivalent Winkler foundation were written, and then the differential equation and boundary conditions were made dimensionless to facilitate the solution. The solution of the dimensionless fourth-order ordinary differential equation was carried out by the differential transformation method, considering the boundary conditions. At the end of the study, an example taken from the literature was solved to investigate the suitability of the solution with the differential transformation method and the results were evaluated.

Keywords: Ballasted railway track; Winkler soil model; Differential transform method; Static analysis

1. GİRİŞ

Ülkeler küreselleşen ticaretin ve seyahatin beraberinde getirdiği yüksek hıza ve daha fazla yük ve yolcu taşımacılığına duyulan talep artışı ile birlikte yeni demiryolu hatları inşa ettikleri gibi mevcut hatlarını da iyileştirme yoluna gitmektedirler. Bu nedenle günümüzde artık gerek şehiriçi ve gerekse şehirlerarası yük ve yolcu taşımacılığında demiryollarının diğer ulaştırma sistemleri içerisindeki payı da her geçen gün giderek artmaktadır.

Demiryolu hatları balastlı ve balastsız olmak üzere farklı şekilde inşa edilebilmektedir [1]. Dünyada ve ülkemizde ise yaygın olarak balastlı demiryolu hatları uygulanmaktadır. Balastlı bir demiryolu hattına ait kesit Şekil 1’de verilmektedir. Şekil 1’den de görüldüğü gibi balastlı demiryolu hatları tipik olarak ray, ray bağlantı elemanları, travers, balast, altbalast ve taban zemininden oluşmaktadır [2].



Şekil 1: Balastlı demiryolu hattı enkesiti [3].

Konvansiyonel yani balastlı demiryolu hatlarında raylar doğrudan tekerlek yüküne maruz kalmakta ve bu yükleri bağlantı elemanları aracılığıyla traverslere aktarmaktadırlar. Traverslere aktarılan gerilmeler ise sırasıyla balast tabakası, altbalast tabakası ve buradan da taşıma kapasitesini aşmayacak şekilde kabul edilebilir bir seviyede taban zeminine iletilmektedir [4].

Demiryolu hattını meydana getiren bileşenlerin her biri farklı özelliklere sahip çeşitli malzemelerden oluşmakta ve bu bileşenlerin yüklemeler altındaki davranışları da farklılık göstermektedir [5]. Demiryolu hatlarının gerek boyutlandırılması ve gerekse işletme sırasında maruz kalacağı yüklemeler altındaki davranışının belirlenebilmesi hattın çeşitli yöntemler ile analiz edilmesini gerekli kılmaktadır [6]. Bu anlamda demiryolu hattının davranışının anlaşılmasındaki ilk önemli çalışma 1867 yılında Emil Winkler tarafından gerçekleştirilmiştir [7], [8]. Bu çalışma ile ortaya konulan modelde ray, sürekli lineer yaylardan oluşan elastik bir zemin üzerinde oturan sonsuz uzunluktaki kiriş olarak düşünülmektedir [9]. Daha sonra Zimmerman 1888’de yapmış olduğu analitik ve deneysel çalışmalar ile Winkler teorisinin demiryolu hesaplamalarında kullanılabileceğini kanıtlamıştır [10], [11]. Hetényi [12] tarafından 1946 yılında yazılan

elastik zemine oturan kirişler ile ilgili kitap şüphesiz bu konudaki temel kaynaklardan biri olarak görülmektedir. Demiryolu hatlarının yükler altındaki farklı davranışlarının ortaya konmasında analitik ve nümerik yöntemlerin kullanılması ile tarihsel süreç içerisinde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir [13], [14], [15], [16], [17]. Literatürde bu konu ile ilgili yapılan çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Cai ve diğ. [9] çalışmalarında demiryolu hat modülünün tanımlanmasında kullanılan bazı mevcut yöntemleri açıklamışlar ve elastik zemin modellerine dayalı yeni bir hat modülü hesaplama yöntemini önermişlerdir. Winkler zemin modeli ve iki parametrelili temel modelini kullanarak beton ve ahşap traversler için farklı hat bileşenleri ve değerleri ile sayısal örnekler çözmüşlerdir. Önerdikleri yaklaşımın nispeten pahalı olan saha testlerinin gerçekleştirilmesi noktasında ihtiyacı ortadan kaldıracak bir fayda sağlayacağını ifade etmişlerdir.

Thambiratnam ve Zhuge [18] farklı rijitliğe sahip yaylar ile modellenen hareketli noktasal yüke maruz elastik zemine oturan bir kirişin dinamik analizi için sonu elemanlar yöntemi önermişlerdir. Ayrıca yöntemi demiryolu hat yapısının analizinde uygulayabilmek amacıyla genişletmişlerdir. Temel rijitliği, ilerleme hızı, kiriş uzunluğu gibi bazı önemli parametrelerin etkilerini incelemişlerdir. Elastik bir temel üzerinde bulunan kirişlerin ve demiryolu raylarının dinamik analizinin gerçekleştirilmesinde bu yöntemin uygun kiriş uzunluğu ve eleman sayısı ile etkili bir yöntem olabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Heelis ve diğ. [19] demiryolu hattındaki düşey yer değiştirmelerin tren hızı ve hat sönümüne bağlı olarak nasıl değiştiğini Winkler zeminine oturan Euler kiriş modelini kullanarak incelemişlerdir. Hat deplasmanının kritik hız aşılıncaya kadar tren hızındaki artış ile artacağını ve bu kritik hızın ise zemin rijitliğine, hat rijitliğine ve temel sisteminin rijitliğine bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Lu ve diğ. [20] elastik bir zemin üzerindeki rayın uygulanan basınç ve düşey yer değiştirme arasındaki ilişkisini açıklamak için kübik bir polinom önermişlerdir. Winkler, Pasternak ve ayrıık olarak modelledikleri demiryolu hat yapısından elde ettikleri sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır. Önerdikleri kübik modelin gerçek demiryolu hat yapısını daha iyi temsil ettiğini ifade etmişlerdir.

Hendry ve diğ. [21] turba zemin üzerinde inşa edilmiş olan hafif yükseklikteki dolgulardan oluşan demiryolu hattının tekrarlı tren yüklerine tepkisini ölçmek amacıyla bir dizi çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada hem arazide hatta oluşan deplasman ölçümlerini yapmışlar hem de deplasmanın büyüklüğü üzerinde dinamik kuvvetlerin büyüklüğünün ve tren hızının etkisini tespit edebilmek amacıyla Winkler modelini kullanmışlardır. Gerçekleştirdikleri analizler sonucu tren yükü altında dolgularda oluşan yer değiştirmelerin dinamik etkilerden ziyade düşük kaliteli dolgu ve yumuşak zemin malzemelerinin statik deformasyonundan kaynaklandığı sonucuna ulaşmışlardır.

Sadeghi ve Barati [22] demiryolu hatlarının analizi ve tasarımında kullanılan mevcut uygulama ve yöntemleri incelemiş ve tasarım ile ilgili önerilerde bulunmuşlardır.

Kumari ve diğ. [23] hareketli dinamik yüklere maruz kalan Winkler tipi elastik bir zemin üzerinde oturan Bernoulli-Euler kirişini incelemişler iki parametre kullanarak modellemişlerdir. Kritik hızın altındaki hızlarda kiriş çökmesinin mutlak değerinin yüklenme hızının artmasıyla arttığını ve en yüksek çökmenin yükün kritik hızda hareket ettiğinde olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Prakoso [24] demiryolu hattını analitik ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmiştir. Sonlu elemanlar analizini ANSYS yazılımını kullanarak iki ve üç boyutlu olarak gerçekleştirmiştir. Elde ettiği sonuçları karşılaştırmak ve doğrulamak amacıyla Zimmermann metodunu kullanarak da hesaplama yapmıştır. Doğrulama sonucunda ANSYS yazılımı ile gerçekleştirdiği iki boyutlu sonlu elemanlar modelinde elde edilen elastik eğrinin Zimmermann yönteminde elde edilene çok benzer olduğunu ancak üç boyutlu sonlu elemanlar modelinde özellikle maksimum çökmenin farklı olarak elde edildiğini belirlemiştir.

Mohanta ve diğ. [25] çalışmalarında demiryolu hattının statik analizini Winkler tipi zemin olarak sürekli ve ayrık olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirmişlerdir. Euler-Bernoulli kiriş teorisi ve Timoshenko kiriş teorisi ile elde ettikleri çökme değerlerini benzer olarak elde etmişlerdir. Ancak ayrık modelden elde edilen sonuçların sürekli model sonuçlarına nazaran literatürde gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalara daha yakın değerler verdiğini belirtmişlerdir.

Aksop ve Güler [26] çalışmalarında Winkler ve sonlu elemanlar yöntemlerini kullanarak balastlı demiryolu hattını elastik zemine oturan kiriş modeli olarak çözüp sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak geliştirilen basit modellerden elde ettikleri kiriş yer değiştirme ve moment değerlerinin geleneksel Winkler yöntemi ile elde ettikleri değerler ile benzer olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Koç [27] demiryolu hattında ray titreşimlerini analiz edebilmek için rayı elastik zemine oturan sürekli bir Euler-Bernoulli kiriş sistemi olarak modellemiştir. Ayrıca çalışmada ray titreşimi ve yer değiştirmesi üzerinde etkili olan ray rijitliği, hız, tekerlek yükü vb. parametreleri farklı taban zemini özelliklerine göre de analiz etmiştir. Ray eğilme modülündeki artışın ray deplasmanını azaltacağı, ray üzerinde hareket halindeki tren hızının artması ve bu hızın kritik hıza yaklaşması ile ray deplasmanın kademeli olarak artacağı ve bu hız ile aynı şekilde titreşim dalgasının genliğinin de artatacağı sonucunu elde etmiştir.

Lamprea-Pineda ve diğ. [28] elastik zemine oturan kiriş teorisinin çeşitli demiryolu mühendisliği problemlerinde kullanıldığı çalışmaları derleyerek demiryolu gürültüsü, demiryolu hat dinamiği ve demiryolu zemin kaynaklı titreşim problemlerinin bu teori ile kullanıldığı uygulamalara ait çözümleri vermişlerdir.

Yelce ve diğ. [29] elastik zemine oturan kiriş teorisinin tarihsel süreçteki gelişimini sunarak bu yaklaşımın demiryolu hatlarının analizlerinde kullanılabilirliğini irdelemişlerdir. Ayrıca çalışmada elastik zemine oturan kiriş modeli için önerilen 4. mertebeden diferansiyel denklemin çözümünü de ayrıntılı olarak sunmuşlardır.

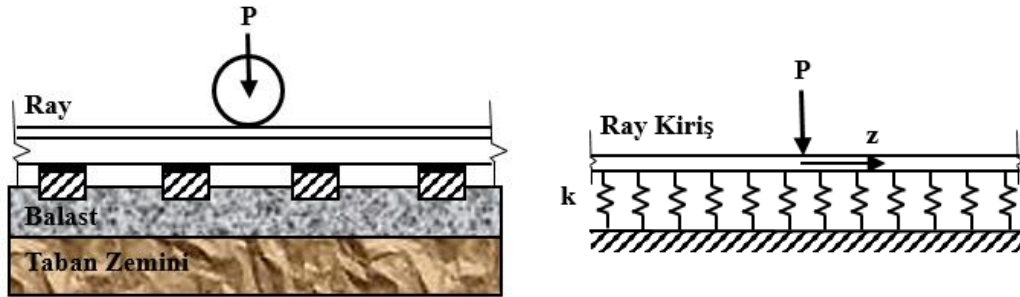
Bu çalışmada ise statik yükler altında Winkler tipi elastik zemine oturan kiriş olarak düşünülen balastlı bir demiryolu hattındaki çökme ve eğilme momenti değerlerini bulmak için diferansiyel dönüşüm yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada öncelikle Winkler tipi elastik zemine oturan kirişe ait diferansiyel denklem yazılarak boyutsuz hale getirilmiş ve boyutsuz hale getirilmiş olan diferansiyel denklemin çözümü, sınır şartları dikkate alınarak Diferansiyel Dönüşüm Yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Diferansiyel dönüşüm yöntemi ile çözüm sayesinde değişken kesit ve değişken zemin koşulları da dikkate alınabilmektedir.

2. YÖNTEM

Çalışmada öncelikle demiryolu hatlarının statik analizi için kullanılan Winkler zemin modeli anlatılmıştır. Daha sonra ise diferansiyel dönüşüm yöntemi kısaca açıklanmıştır. Bu bölümün sonunda ise diferansiyel dönüşüm yönteminin balastlı demiryolu hat problemine uygulanması yapılmıştır.

2.1. Winkler zemin modeli

Şekil 2’de görülen ve orta noktasından bir tekerlek yükü (P) ile yüklenen sonsuz uzunluklu bir demiryolu hattı ve bunun eşdeğer Winkler modeli görülmektedir.



Şekil 2. Orta noktasından bir tekerlek yükü ile yüklenen demiryolu hattı ve eşdeğer Winkler kiriş modeli [9].

Şekil 2’de verilen Winkler modelinin dördüncü mertebeden diferansiyel denklemini aşağıdaki gibi yazılır [26], [29].

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + k_s b y = 0 \quad (1)$$

(1) no.lu diferansiyel denklemdeki parametreler Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1: Diferansiyel denklemde kullanılan parametreler

Parametre	Açıklama
E	Elastisite modülü
I	Atalet momenti
k_s	Zemin yatak katsayısı
b	Kiriş genişliği
L	Kiriş uzunluğu
y	Elastik eğri fonksiyonu
z	Konum

(1) no.lu diferansiyel denklemi boyutsuz hale getirmek amacıyla (2) no.lu dönüşüm uygulanırsa (3) no.lu boyutsuz diferansiyel denklem elde edilir.

$$\varepsilon = \frac{z}{L} \quad (2)$$

$$\frac{EI d^4y}{L^4 d\varepsilon^4} + k_s b y = 0 \quad (3)$$

(3) no.lu diferansiyel denklem düzenlenirse (4) no.lu denklem elde edilir.

$$\frac{d^4y}{d\varepsilon^4} + \frac{k_s b L^4}{EI} y = 0 \quad (4)$$

(4) no.lu diferansiyel denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d^4y}{d\varepsilon^4} + \alpha y = 0 \quad (5)$$

(5) no.lu denklemdeki α aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\alpha = \frac{k_s b L^4}{EI} \quad (6)$$

Problemin sınır koşulları ise orta noktada dönme sıfır ve kesme kuvveti $Q(0)=P/2$ ‘dir. En uçta ise çökme ve eğilme momenti sıfırdır. Bunlar literatürden bilindiği üzere boyutsuz halde (7) (8) (9) ve (10) no.lu denklemlerle yazılabilir.

$$1. \quad \varepsilon = 0 \quad \frac{dy}{d\varepsilon} \frac{1}{L} = 0 \quad (7)$$

$$2. \quad \varepsilon = 0 \quad \frac{EI}{L^3} \frac{d^3 y}{d\varepsilon^3} = -Q(0) \quad (8)$$

$$3. \quad \varepsilon = 1 \quad y = 0 \quad (9)$$

$$4. \quad \varepsilon = 1 \quad \frac{EI}{L^2} \frac{d^2 y}{d\varepsilon^2} = 0 \quad (10)$$

2.2. Diferansiyel dönüşüm yöntemi ile çözüm

Diferansiyel dönüşüm yöntemi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan ve esasını Taylor seri açılımdan alan etkili bir yöntemdir [30], [31], [32]. Taylor seri açılımı yardımıyla (11) no.lu denklem yazılabilir [33], [34].

$$y(\varepsilon) = \sum_{k=0}^{\infty} \varepsilon^k Y[k] \quad (11)$$

(11) no.lu denklemde $Y[k]$ ifadesi dönüşüm fonksiyonu olarak adlandırılmakta olup aşağıdaki gibi yazılır [33], [34].

$$Y[k] = \frac{1}{k!} \left[\frac{d^k y(\varepsilon)}{d\varepsilon^k} \right]_{\varepsilon=0} \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (12)$$

(12) no.lu bağıntı (11) de yerine yazılırsa (13) no.lu bağıntı elde edilir [33], [34].

$$y[k] = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\varepsilon^k}{k!} \left[\frac{d^k y(\varepsilon)}{d\varepsilon^k} \right]_{\varepsilon=0} \quad (13)$$

(11) no.lu bağıntının diferansiyel dönüşümü (14) no.lu bağıntı ile gösterilir [33], [34].

$$DT(\varepsilon^\theta y^\beta) = \left[\prod_{i=1}^{\beta} (k - \theta + i) \right] Y(k - \theta + \beta) \quad (14)$$

(14) no.lu bağıntıdaki y^β ifadesi aşağıdaki gibi gösterilmiştir [33], [34].

$$y^\beta = \frac{d^\beta y(\varepsilon)}{d\varepsilon^\beta} \quad (15)$$

(14) no.lu dönüşüm (5) no.lu diferansiyel denklemde uygulanırsa (16) no.lu bağıntı elde edilir [33], [34].

$$Y[k + 4] = \frac{-\alpha Y[k]}{(k + 4)(k + 3)(k + 2)(k + 1)} \quad k = 0 \dots n \quad (16)$$

(7) ve (8) no.lu sınır koşulları uygulanırsa (17) ve (18) no.lu eşitlikler elde edilir.

$$Y[1] = 0 \quad (17)$$

$$Y[3] = \frac{-Q(0)L^3}{6EI} \quad (18)$$

$Y[0]$ ve $Y[2]$ değerleri bilinmeyen olarak seçilirse diğer tüm Y 'ler ikisi cinsinden (16) no.lu bağıntı ile bulunabilir.

(9) ve (10) no.lu sınır koşullarına da diferansiyel dönüşüm uygulanırsa (19) ve (20) no.lu denklemler yazılabilir.

$$\sum_{i=0}^{n+4} Y[i] = 0 \quad (19)$$

$$\sum_{i=0}^{n+4} Y[i]i(i - 1) = 0 \quad (20)$$

(19) ve (20) no.lu denklemler matris formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y[0] \\ Y[2] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} e \\ f \end{Bmatrix} \quad (21)$$

(21) no.lu denklem daha kısa olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{A} \begin{Bmatrix} Y[0] \\ Y[2] \end{Bmatrix} = \mathbf{B} \quad (22)$$

(22) no.lu denklemin çözümünden $Y[0]$ ve $Y[2]$ değerleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$\begin{Bmatrix} Y[0] \\ Y[2] \end{Bmatrix} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} \quad (23)$$

$Y[0]$ ve $Y[2]$ bulunduktan sonra (16) no.lu bağıntıyla tüm Y değerleri bulunabilir. Y' ler bulunduktan sonra ise (11) no.lu bağıntı yardımıyla yer değiştirme fonksiyonu ve onun ikinci türevi yardımıyla ise eğilme momenti fonksiyonu elde edilir.

3. SAYISAL ÖRNEK ÇÖZÜMÜ

Bu bölümde literatürden [26] alınan örnek, diferansiyel dönüşüm yöntemi ile çözülmüştür. Diferansiyel dönüşüm yönteminin çözümü için Scilab ortamında bir program yazılmış ve çözümlerden elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 2’de örneğe ait özellikler verilmiştir.

Çizelge 2: Sayısal örneğe ait özellikler [26]

Malzeme	Özellik
Ray tipi	S49
Ray atalet momenti	1816 cm ⁴
Ray elastisite modülü	210 000 MPa
Ray poisson oranı	0.3
Travers boyu	240 cm
Travers genişliği	25 cm
Travers yüksekliği	25 cm
Travers kenar uzunluğu	50 cm
Travers aralığı	65 cm
Travers elastisite modülü	10 000 MPa
Balast derinliği	40 cm
Balast yatak katsayısı	70 N/cm ³
Balast poisson oranı	0.35
Teker yükü	100 kN

Çizelge 3’de ise farklı terim sayıları için diferansiyel dönüşüm yöntemi ile elde edilen orta noktanın yer değiştirme ve eğilme moment değerlerinin literatür ile karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 3: Sayısal çözüm sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması

	Diferansiyel Dönüşüm Yöntemi					Winkler [26]
	N=5	N=10	N=15	N=20	N=25	
Çökme (cm)	0.059	0.13825	0.14873	0.17315	0.1734	0.1734
Eğilme Momenti (kNcm)	5050.42	2198.12	2578.40	2677.66	2678.32	2677.78

4. SONUÇ

Bu çalışmada balastlı demiryolu hatlarının statik yükler altında analizi için diferansiyel dönüşüm yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada demiryolu hattı eşdeğer Winkler zeminine oturan bir Euler-Bernoulli kirişi olarak modellenmiş ve bu modele uygun olarak yazılan ve literatürden bilinen diferansiyel denklem ve sınır koşullarına diferansiyel dönüşüm yöntemi uygulanmıştır. Çalışmanın sonunda sunulan yöntemin uygunluğunu göstermek üzere çözülen örnekte 25 terim sayısı ile analitik çözümün yakalandığı

görülmüştür. Sunulan diferansiyel dönüşüm yöntemi özellikle pratik ve hızlı olması nedeniyle zemin ve kirişin değişken olması durumlarında iyi bir alternatif olarak düşünülebilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

İ.Ş.: Kavramsallaştırma, yöntem, araştırma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

K.B.B.: Kavramsallaştırma, yöntem, yazılım, doğrulama, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

KAYNAKLAR

[1] Indraratna, B., Salim, W. and Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced rail geotechnology - ballasted track* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10861>

[2] Selig, E. T. and Waters, J. M., (1994). *Track geotechnology and substructure management*, Thomas Telford Publications, London, ISBN: 0 7277 2013 9.

[3] Guo, Y., Xie, J., Fan, Z., Markine, V., Connolly, D. P. and Jing, G. (2022). Railway ballast material selection and evaluation: A review. *Construction and Building Materials*, 344, 128218. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128218>

[4] Burrow, M. P. N., Bowness, D. and Ghataora, G. S. (2007). A comparison of railway track foundation design methods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 221(1), 1-12. <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT58>

[5] Kalliainen, A., Kolisoja, P. and Nurmikolu, A. (2016). 3D finite element model as a tool for analyzing the structural behavior of a railway track. *Procedia engineering*, 143, 820-827. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.133>

[6] Lassoued, R. and Guettiche, A., (2011). Mechanical behaviour of railway track, *Physics Procedia*, Volume 21, 2011, Pages 166-173, ISSN 1875-3892, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.10.025>

[7] Winkler, E. (1867). *Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit, mit Besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Technik*. H. Dominicus, Prague, Czech Republic.

[8] Sadeghi J. (1997). Investigation of characteristics and modeling of railway track system, PhD Thesis, Department of Civil Mining, and Environmental Engineering, the University of Wollongong, Australia.

[9] Cai, Z., Raymond, G. P. and Bathurst, R. J. (1994). Estimate of static track modulus using elastic foundation models. *Transportation Research Record*, 1470, 65.

[10] Zimmermann, H., (1888). *Die Berechnung des Eisenbahnoberbaues* (The analysis of the railroad track, In German), Verlag W. Ernst and Sohn, Berlin, 1888.

[11] Kerr, A. D. (1976). *On the stress analysis of rails and ties* (No. DOT-TSC-FRA-76-16). United States. Federal Railroad Administration.

[12] Hetényi, M. (1946). *Beams on elastic foundation theory with applications in the fields of civil and mechanical engineering*. University of Michigan Press, Michigan, 255 s.

- [13] Ahlbeck, D. R., Meacham, H. C. and Prause, R. H. (1978). The development of analytical models for railroad track dynamics. In *Railroad track mechanics and technology* (pp. 239-263). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-021923-3.50017-6>
- [14] Suiker, A. S. and de Borst, R. (2003). A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks. *International journal for numerical methods in engineering*, 57(4), 441-470. <https://doi.org/10.1002/nme.683>
- [15] Czyczula, W., Koziol, P., Kudla, D. and Lisowski, S. (2017). Analytical evaluation of track response in the vertical direction due to a moving load. *Journal of Vibration and Control*. 2017;23(18):2989-3006. doi:10.1177/1077546315625823
- [16] Ngo, N. T., Indraratna, B. and Rujikiatkamjorn, C. (2017). Simulation ballasted track behavior: numerical treatment and field application. *International Journal of Geomechanics*, 17(6), 04016130. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000831](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000831)
- [17] Gesualdo, A. and Penta, F. (2018). A model for the mechanical behaviour of the railway track in the lateral plane. *International Journal of Mechanical Sciences*, 146, 303-318. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.06.041>
- [18] Thambiratnam, D. and Zhuge, Y. (1996). Dynamic analysis of beams on an elastic foundation subjected to moving loads. *Journal of sound and vibration*, 198(2), 149-169. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0562>
- [19] Heelis, M. E., Collop, A. C., Chapman, D. N. and Krylov, V. (1999). Predicting and measuring vertical track displacements on soft subgrades. In *Proceedings of the Railway Engineering—Second International Conference and Exhibition*, London, UK, 25–26 May.
- [20] Lu, S., Arnold, R., Farritor, S., Fateh, M. and Carr, G. (2008). On the relationship between load and deflection in railroad track structure. In *Proceedings of the AREMA 2008 Annual Conference*, Salt Lake City, UT.
- [21] Hendry, M., Hughes, D. A. and Barbour, L. (2010). Track displacement and energy loss in a railway embankment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 163(1), 3-12. <https://doi.org/10.1680/geng.2010.163.1.3>
- [22] Sadeghi, J., and Barati, P. (2010). Evaluation of conventional methods in analysis and design of railway track system. *International Journal of Civil Engineering*, 8(1): 44–55.
- [23] Kumari, S., Sahoo, P. P. and Sawant, V. A. (2012). Dynamic response of railway track using two parameter model. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 1(2), 143-147.
- [24] Prakoso, P. B. (2012). The basic concepts of modelling railway track systems using conventional and finite element methods. *Info-Teknik*, 13(1), 57-65.
- [25] Mohanta, M., Setu, G., Srivastava, J. P., Sarkar, P. K. and Ranjan, V. (2015). Static analysis of railway track. *Proceedings of India International Science Festival. Young Scientists' Meet*, 2015.
- [26] Aksop, E. Y. and Güler, H. (2017). Analysing railway substructure and superstructure by using finite element methods and dimensioning of track components. In *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 29-30 September 2017 (ISITES2017 Baku-Azerbaijan)*.
- [27] Koç, M. A. (2021). Analytic method for vibration analysis of track structure induced by high-speed train. *Sakarya University Journal of Science*, 25(2), 429-438. <https://doi.org/10.16984/soaufenbilder.823255>
- [28] Lamprea-Pineda, A. C., Connolly, D. P. and Hussein, M. F. (2022). Beams on elastic foundations—A review of railway applications and solutions. *Transportation Geotechnics*, 33, 100696. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100696>

- [29] Yelce, T. U., Balcı, E. and Bezgin, N. Ö. (2023). A discussion on the beam on elastic foundation theory. *CHALLENGE*, 9(1), 34-47.
- [30] Zhou, J. K. (1986). *Differential transformation and its applications for electrical circuits*, Huazhong University Press, Wuhan, China.
- [31] Agarana, M. C., and Ede, A. N. (2016). Application of differential transform method to vibration analysis of damped railway bridge on Pasternak foundation under moving train. In *Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science*. Vol II WCE 2016, June 29 - July 1, 2016, London, U.K.
- [32] Balkaya, M., Kaya, M. O., and Sağlamer, A. (2009). Analysis of the vibration of an elastic beam supported on elastic soil using the differential transform method. *Archive of Applied Mechanics*, 79, 135-146.
- [33] Rajasekaran, S., (2009). *Structural dynamics of earthquake engineering: theory and application using mathematica and matlab*, India, Woodhead Publishing.
- [34] Bozdoğan, K. B. and Khosravi, F. (2021). Application of differential transformation method and Dunkerley formula for stability analysis of bars in water. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 169-174.

Su Ürünlerinde Histamin Oluşumu ve Önemi

Ecem Bayraktar¹, Harun Uran^{1*}

¹Gıda Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye

Geliş: 02.11.2023, Kabul: 09.12.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

ÖZ

Biyojen aminler, canlı organizmaların faaliyeti sonucu oluşan düşük molekül ağırlığa sahip bazik özellikteki bileşiklerdir. İnsanlarda ve hayvanlarda birçok toksisiteye sebep olan biyojen aminler, vücutta sentezlenebildiği gibi gıdalar aracılığıyla da vücuda alınabilir. Bu toksisiteye sebep olan biyojen aminlerden biri de “histamin”dir. Histamin, et ürünleri, meyve-sebze, süt ve ürünlerinde bulunmasının yanı sıra en çok su ürünleri ile ilişkilendirilir. Su ürünlerinde histamin zehirlenmesine genellikle *Scrombridae* familyasına ait balık türlerinin sebep olması nedeniyle bu zehirlenmeye “Scrombroid zehirlenmesi” de denmiştir. Bu zehirlenmenin belirtileri, kusma, ciltte kaşıntı ve kızarıklık, ödem, mide bulantısı, hipotansiyon, baş ağrısı, yanma ve çarpıntı şeklinde olmaktadır. Zehirlenme sonucu oluşan semptomlar çoğu gıda zehirlenmesi ile benzer olduğundan çoğunlukla karıştırılmakta ve bu durum da histamin zehirlenmelerine yönelik kayıtların tutulmasını zorlaştırmaktadır. Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) 100 g balık etinde bulunabilecek histamin miktarını 50 mg/kg olarak limitlendirmiştir. Avrupa Birliği’ne üye ülkelerde ve Türkiye’de ise taze ve soğutulmuş balıkta bulunabilecek histamin miktarı 100 mg/kg olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada su ürünlerinde histamin oluşum nedenleri ile çeşitli su ürünlerinde histamin oluşumuna yönelik yapılan çalışmalardan bilgiler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyojen aminler; Histamin; Su ürünleri.

Histamine Formation and Its Importance in Seafood

ABSTRACT

Biogenic amines are basic compounds with low-molecular-weight that are formed due to the activities of living organisms. Biogenic amines, which cause toxicity in humans and animals, can either be synthesized in the human body or taken from foods. One of the most important biogenic amines is “histamine”. Although histamine can be present in meat, fruits-vegetables, and dairy products, it is most commonly related to seafood. Since histamine poisoning in seafood is generally caused by fish species belonging to the *Scombridae* family, this poisoning is also called “Scombroid poisoning”. Symptoms of this poisoning include vomiting, skin itching and redness, edema, nausea, hypotension, headache, burning sensation and palpitations. Since the symptoms resulting from poisoning are similar to those of food poisoning, they are often confused, which makes it difficult to keep records for histamine poisoning. The American Food and Drug Administration (FDA) limits the amount of histamine that can be found in 100 g of fish meat to 50 mg/kg. In the European Union member countries and Turkey, the amount of histamine that can be found in fresh and chilled fish is determined as 100 mg/kg. In this study, information is given about the reasons for histamine formation in seafood and studies on histamine formation in various seafood products.

Keywords: Biogenic amines; Histamine; Seafood.

1. GİRİŞ

Biyojen aminler, farklı mikroorganizmaların metabolizmaları sonucu serbest amino asit dekarboksilasyonundan veya karbonil içeren organik bileşiklerin aminasyonundan kaynaklanan, canlı olan hücrelerde önemli bir metabolik faaliyete sahip azotlu bileşiklerdir [1]. Bu aminlerin “biyojen aminler” olarak isimlendirilmelerinin sebebi, yaşayan organizmaların faaliyetleri neticesinde meydana gelmeleridir. Mikrobiyal ya da biyokimyasal aktivite koşulları sağlandığında biyojen amin oluşması istenilen bir durumdur [2]. Biyojen aminler hayvanlarda ve insanlarda işlevsel fonksiyonların meydana gelmesinde büyük rol oynamaktadırlar. DNA (Deoksiribo nükleik asit), RNA (Ribonükleik asit) ve protein sentezinin pek çok basamağında görev aldıkları için hücrelerin büyümesinde ve çoğalmasında önemlidir [3]. Birtakım aminlerin insanlarda, kan dolaşımının düzenlenmesinde dönüştürücü madde olarak merkezi sinir sisteminde, hormon olarak ve düz kaslarda hayati görevleri bulunmaktadır [4].

Protein yıkımı ile meydana gelen biyojen aminler esas olarak, amino asitlerin sekonder dönüşmesi, azottan serbest metabolizma ürünlerinin aminleşmesi, azotlu bileşikler ile azotlu parçalanma ürünlerinin hidrolize olmaları sonucunda oluşmaktadırlar [5]. Biyojen aminler ihtiva ettikleri azot sayısına göre; monoaminler, diaminler, poliaminler olarak gruplanırlar [6]. Kimyasal niteliklerine göre de aromatik ve heterosiklik aminler, alifatik di-, tri-, poliaminler son olarak da alifatik uçucu aminler olarak gruplandırılmaktadırlar [7]. Biyojen aminleri kimyasal yapılarına veya ihtiva ettikleri azot sayılarına göre sınıflandırmak mümkündür (Çizelge 1).

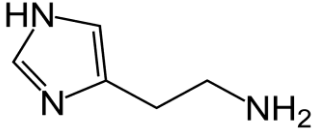

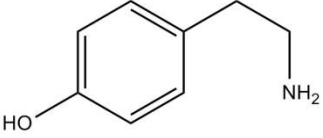

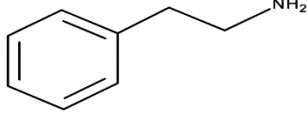
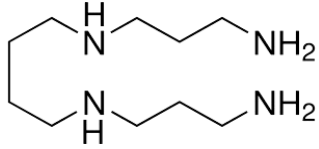
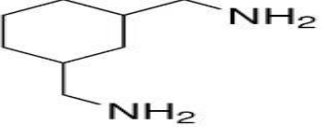
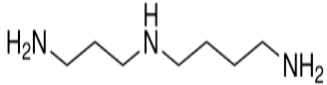
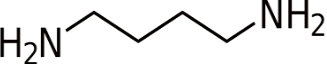
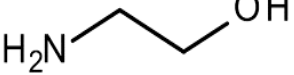
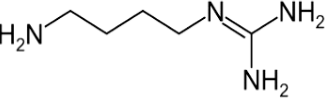
Çizelge 1: Biyojen aminlerin sınıflandırılması [8].

Kimyasal Yapılarına Göre			İçerdikleri Azot Sayısına Göre		
Aromatik ve heterosiklik aminler	Alifatik Di-, Tri- ve poliaminler	Alifatik uçucu aminler	Monoaminler	Diaminler	Poliaminler
Histamin	Putresin	Etilamin	Metilamin	Histamin	Agmatin
Tiramin	Kadaverin	Metilamin	Etilamin	Triptamin	Spermin
β -feniletilamin	Agmatin	İzoamilamin	İzopentilamin	Putresin	Spermidin
Triptamin	Spermin	Etanolamin	Etanolamin	Kadaverin	
Serotonin	Spermidin		β -feniletilamin	Serotonin	
			Tiramin		

Gıdalarda meydana gelen esas biyojen aminler histamin, tiramin, β -feniletilamin, metilamin, putresin, agmatin, kadaverin, etilamin, spermidin, etanolamin ve spermidin olarak belirtilebilir [9]. Bakteriyel faaliyetler sonucu ornitin, histidin ve lizin aminoasitleri sırası ile histamin, kadaverin ve son olarak da putresine dönüşmektedir. β -feniletilamin, tiramin ve triptamin benzeri biyojen aminler ise bakteriyel dekarboksilasyon sonucu fenilalanin, tiyrosin ve triptofan aminoasitlerinden meydana gelmektedirler.

Arjinin aminoasidi kolaylıkla agmatine dönüştürülebilmekte veya bakteriyel aktivitenin sonucu olarak ornitine indirgenebilmektedir. Ornitin ise dekarboksilasyon sonucu putresine dönüşmektedir [10]. Gıdalar açısından önem taşıyan bazı biyojen amin çeşitleri ve onların kimyasal yapıları Çizelge 2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2: Gıdalar açısından önem taşıyan bazı biyojen amin çeşitleri ve kimyasal yapıları

Biyojen amin	Kimyasal Yapısı	Biyojen amin	Kimyasal Yapısı
Histamin		Kadaverin	
Tiramin		Etilamin	
Feniletilamin		Spermin	
Metilamin		Spermidin	
Putresin		Etanolamin	
Agmatin			

Memelilerin bağırsaklara ilişkin bölgelerinde var olan detoksifikasyon (detoks) sistemleri, gündelik diyetle alınmış olan biyojen aminleri metabolize etme kabiliyetindedir. Uygun şartlarda gıdalar ile beraber alınan biyojen aminler, amin oksidazlar ile birlikte reaksiyona girerek çabucak detoksifiye edilir ve biyojen aminlerin dolaşıma ulaşmaları frenlenerek toksik etki oluşturamaz hale gelirler. Ama alerjik kişilerde, monoaminooksidaz ile diaminooksidaz enzimlerinin genetik açıdan eksikliğinde, bu enzimleri azaltan ağrı kesiciler, depresyon, stres ilaçları, Parkinson ve Alzheimer tedavisinde kullanılan ilaçların alınması durumunda, gastrointestinal rahatsızlık durumunda veya çok fazla düzeyde biyojen amin bulunduran besinlerin alındığı takdirde detoksifikasyon işlemi meydana gelememekte, bunun neticesinde biyojen aminler vücutta birikmektedir [11]. Biyojen aminlerin esas tesir mekanizmaları psikoaktif veya vasoaktifir. Adrenalin, dopamin ve noradrenalin gibi aminler psikoaktif aminler olup etkileri sinir sistemi üzerinde nörotransmitterdir. Histamin ve tiramin gibi aminler ise vasoaktif aminler olup tesirleri doğrudan ya da dolaylı olmak suretiyle vasküler sistemle ilişkilidir [12]. Bütün biyojen aminlerin sahip oldukları toksik etki eşit değildir. β -feniletilamin, histamin ve tiramin içerisinde en yüksek toksisite gösteren aminlerdir [9]. İçerisinde biyojen amin bulunan gıdaların alınmasıyla birlikte bir çok farmakolojik etkiler oluşmaktadır. Bunlar tiramin toksisitesi, histamin toksisitesi gibi bir sürü rahatsızlığın meydana gelmesinde etkili olmaktadır [12]. Biyojen amin toksisitesinin karakteristik semptomları baş ağrısı, ishal, hipertansiyon, hipotansiyon ve bulantıdır [13].

Biyojen aminler gıdalarda iki sebepten ötürü önem arz eder. İlki, biyojen amin düzeylerinin gıdalar için bir kalite kriteri olması, diğeri ise sağlığa tesir eden toksik etkilerinin bulunmasından kaynaklanmaktadır [14]. Histamin gıdaların içerisinde kendiliğinden var olabildiği gibi, uygun olan koşullar sağlandığında bakteriyel dekarboksilasyon yoluyla da meydana gelebilir. Gıdalardaki histaminojenik potansiyel o gıdanın içerisinde bulunan histidin miktarına, çevre koşullarına ve bakteriyel histidin dekarboksilaz enziminin mevcudiyetine bağlıdır. Histaminin oluşabilmesi için ortamda lösin, alanin, sistin, asparagin ve glisin gibi aminoasitlerin var olması gerekmektedir. Bakteriyel dekarboksilasyon ile histamin oluşabilmesi için gereken optimum pH 5 ilâ 5,5'tir. İçerisinde histamini yüksek oranda barındıran gıdaların başında su ve su ürünleri gelmektedir [15]. Bayatlamış balıkların içerisinde *Achromobacter histaminum* gibi yüksek dekarboksilaz aktivitesine neden olan bakterilerin var olması histaminin oluşmasına sebep olur. Balık ve balık ürünlerinde histamin üretebilme potansiyeline sahip olan mikroorganizmalar *Enterobacter aerogenes*, *Hafnia alvei*, *Proteus morgani*, *Proteus incostans*, *Enterobacter coacloacae*; Clostridium, Betabacterium, Pseudomonas, Achromobacter, bazı Salmonella türleridir [15]. Balık ve balık ürünlerinde histaminin meydana gelmesinde depolama sıcaklıklarının etkisi üzerine yapılmış olan birçok çalışmada 0°C'nin altında görmezden gelinecek düzeyde histaminin oluştuğu belirtilmiştir. Aynı zamanda balıklarda histaminin meydana gelmesi için gerekli olan optimum derecenin 15-20 °C olduğu ve maksimum olarak 30-38°C'ye çıkabileceği de tespit edilmiştir [13]. İngiltere'de 1976 yılından 1986 yılına kadar balık

zehirlenmesiyle ilişkili 250 şüpheli görünen vakanın bulunduğu araştırma neticesine dayanarak histamin tespiti için limit bir doz belirlenmiştir. Her 100 g balıkta limit dozları 5 mg'dan az çıkan balık güvenli olarak kabul edilirken, bu değer 5-20 mg sınırları içerisinde ise balık yüksek ihtimalle toksik ya da 100 mg değerinden daha yüksek ise balık toksik olarak kabul edilir ve alınması sakıncalıdır. AB (Avrupa Birliği) 100 g balıkta yasal sınırı 100 mg/kg olarak kabul ederken, FDA bu sınırı 50 mg/kg olarak belirtmiştir [16]. 2011 yılında yayınlanan Türk Gıda Kodeksi (TGK) ise dondurulmuş balık ve taze soğutulmuş balık için bu değeri 100 mg/kg olarak belirtirken, konserve balık ürünlerinde izin verilen en yüksek değeri 200 mg/kg olarak bildirmiştir [17].

2. SU ÜRÜNLERİNDE HİSTAMİN TOKSİSİTESİ

Histamin zehirlenmesi, içerisinde yüksek miktarda histamin barındıran besinlerin vücuda alınması sonucunda meydana gelen gıda zehirlenmesi olarak tanımlanmaktadır. Histamin zehirlenmesine Scombridae familyasından olan balıkların sebep olması nedeniyle bu zehirlenme “Scombroid zehirlenmesi” olarak adlandırılmıştır. Dünya geneline baktığımızda su ve su ürünlerinden kaynaklanan toksisiteye en çok bu balık türlerinde rastlandığı görülmüştür [18]. Torik, ton, lüfer, zurna ve uskumru Scombridae familyasından olup, histamin zehirlenmesi ile en çok ilişkilendirilen iki balık türü ton ve uskumru balıklarıdır [19]. Scombridae familyasındaki bu türler, kaslarında bulunan fazla miktardaki serbest histidini yayarak gıda zehirlenmesine neden olmaktadır. Bu familyaya mensup olmayan ancak zehirlenmeye neden olan farklı türlere ait olan balıklar da vardır. Bu balıklara örnek olarak sardalya, hamsi, kızıl somon, mahimahi, sarıkuyruk ve ateş balığı belirtilebilir [20].

Histamin miktarının 1 g/kg (ringa balığı) ile 15 g/kg (ton balığı) arasında farklılık gösterdiği bildirilmiştir [21] Buna rağmen, yeni yakalanmış ton balığının genel olarak 0,1 mg/100 g'dan daha az ve ihmal edilebilir seviyede histamin içerdiği bildirilmiştir [10]. Yoshida ve Nakamura [22] tarafından yapılan bir çalışmada, taze uskumru balığının histamin içermediği tespit edilmiştir. Mackie ve ark. [23], serin koşullarda (10 °C) ve buzda depolanan uskumru ve ringa balığındaki biyojen amin oluşumunu değerlendirmiş ve 13 gün boyunca depolanmış ringa ile uskumru balığındaki histamin seviyesinin EEC (Avrupa Ekonomik Topluluğu) tarafından limit olarak belirtilen 10 mg/100 mg seviyesinden çok daha düşük olduğunu gözlemlemiştir.

Dahası, iç organlarından arındırılmış olan balıklarda histamin miktarının daha az olduğu tespit edilmiştir [24]. Taze olan Scombroidae türleri serbest histamini barındırmasa da biyojen aminler sıcaklığın etkisiyle bozulma anında oluşabilmektedir. Buna örnek olarak, 18 gün boyunca 4 °C'de depolanan uskumrularda histamin miktarı düşük tespit edilirken, 5 gün 10 °C'de depolanan uskumrularda histamin miktarı çok

daha fazla bulunmuştur [25]. İşlenmiş olan taze ton balığında histamin miktarı yaklaşık olarak 0,32 µg/kg iken, konserve ton balıklarında bu değer 40,5 µg/kg olarak saptanmıştır [24].

Histamin toksisitesindeki belirtiler kusma, kızarıklık, ödem, mide bulantısı, hipotansiyon, baş ağrısı, ürtiker, cilt kızarması, yanma ve çarpıntı olarak göstermekte ve antihistaminik ilaçlar kullanılarak tedavi edilmektedir [17]. Yapılan bir çalışmaya göre gıda alımı sonrasında alerjik tepkiler gösteren hastaların, gıda tüketiminin durması halinde kronik kurdeşen rahatsızlığı ve alerjik tepkimeler göstermemeleri, gıdalarda bulunan aminlerin alınması ile ilişkilendirilmektedir [26]. Histamin toksisitesinin belirtileri genellikle 30 dakika ve 5 saat arasında olup bozulmuş balığın tüketiminin hemen ardından başlar ve genel olarak 10 dakika ile 3 saat boyunca devam eder [27].

3. SU ÜRÜNLERİNDE HİSTAMİN TESPİTİ

Gıdaların üretimi ile işlenmesi sırasında oluşan çeşitli bileşenlerin ve kalıntıların belirlenmesinde çok farklı yöntemler kullanılmakla birlikte, son dönemde ağırlıklı olarak kromatografik yöntemler tercih edilmektedir [28, 29, 30, 31]. Su ve su ürünlerindeki histaminin tespit edilebilmesi için de pek çok farklı yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin çoğu deniz toksinlerine ait olmasına rağmen, balıkta bulunan yüksek seviyede histamini belirlemek için ucuz ve zahmetsiz kolorimetrik metotları kullanılabilirken, düşük seviyelerdeki histaminin tespiti için LC-MS (Sıvı Kromatografisi-Kütle Spektrometresi) metotları kullanılmaktadır [20]. Su ve su ürünlerinde histamin tespitinde genellikle kullanılan yöntem yüksek performanlı sıvı kromatografisine (HPLC) dayanmaktadır [32]. Ayrıca histamin tespiti için ELİSA (enzyme-linked immunosorbent assay) test kitleri de kullanılabilir [17].

Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından Scombroid veya benzeri balık türlerinde histamin miktarı için izin verilmiş en yüksek değer 50 ppm'dir. Aynı limit AB (Avrupa Birliği) yönetmeliğinde 100 ppm olarak belirtilmiştir [33]. Almanya su ve su ürünlerinde histamin tespiti için yasal limiti 200 ppm olarak belirlemiştir. İsviçre, Finlandiya ve Kanada'da ise histamin için maksimum limit 100 ppm'dir. Türkiye'de ise AB'ye uyum sağlayabilmek amacıyla histamin limit değeri 200 mg/kg olarak belirlenmiştir [34].

3.1. Su ürünlerinde histamin tespiti üzerine yapılan çalışmalar

Tan ve ark. [35] tarafından yapılan bir çalışmada, Raman saçılımı (TLC-SERS) algılama metotlarıyla birlikte ince tabaka kromatografisi kullanılarak yapay ve doğal olarak bozulmuş ton balığı solüsyonlarında histaminin hassas, düşük maliyetli ve güvenilir bir şekilde tespit edilebildiğini bildirmiştir. Araştırmacılar, bu yöntem ile yapay olarak bozulmuş ton balığı solüsyonundaki histamin miktarını 10 ppm'e kadar tespit edebilmiştir. Lin ve ark. [36], Mahimahi balığında bakteri oluşumu ile toplam uçucu madde miktarındaki değişimi incelemek amacıyla *Raoultella ornithinolytica* ile inoküle edilen (2.0 log kob/g veya 5.0 log

kob/g) balıkları farklı sıcaklıklarda (4, 15, 25 ve 37 °C) depolamıştır. Mahimahi balığındaki histamin miktarının 15 °C üzerindeki sıcaklıklarda arttığı gözlemlenmiştir. Düşük seviyede (2.0 log kob/g) inoküle edilen ve 37 °C’de depolanan örneklerde ve yüksek seviyede (5.0 log kob/g) inoküle edilen ve 25 °C veya daha yüksek sıcaklıkta depolanan örneklerde 12 saat içerisinde histamin seviyesi 50 mg/100 g’ın üzerine çıkmıştır.

Duyar ve Ekici [37] tarafından yapılan bir çalışmada, Van’da bulunan marketlerden toplanmış olan 28 farklı balık konservesinin (9 uskumru, 12 ton balığı ve 7 sardalya) histamin miktarı incelenmiştir. Araştırmacılar, uskumru, ton balığı ve sardalya konserveleri için minimum ve maksimum histamin değerlerini sırasıyla 19,69-28,08 ppm, 19,34-28,81 ppm ve 22,30-78,33 ppm olarak belirlemiş olup histamin toksik düzeylerinin FDA limitinden düşük olduğunu bildirmişlerdir. Bir başka çalışmada ise Isparta’da bulunan marketlerden ve taze satış yapan balıkçılardan donmuş hamsi, donmuş halka palamut, sardalya konservesi, taze palamut, ton balığı konservesi, sade uskumru konservesi, taze uskumru ve soslu çipura filetoları, limon soslu konverse uskumru ve taze levreğin içerisindeki biyojen amin miktarları değerlendirilmiştir. Çalışma neticesinde taze balık numunelerindeki amin oluşumunun düşük düzeyde olduğu, aksine konserve balıklarda amin seviyesinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. En yüksek histamin miktarı (8,16 mg/100 g) sardalya konservesinde tespit edilmiştir [38]. Kızanlık ve ark. [39], Aydın’da satışa sunulan 50 adet balık numunesinde (15 uskumru, 20 istavrit ve 15 palamut) histamin seviyesini tespit etmiştir. Araştırmacılar palamut, uskumru ve istavrit balıkları için en düşük ve en yüksek histamin düzeyleri sırasıyla 4,72-9,94; 3,45-7,47 ve 3,92-30,32 ppm olarak belirlemiştir. Ayrıca tüm balık örneklerinde histamin seviyesinin Su Ürünleri Yönetmeliği [40] tarafından belirtilen yasal sınırlar içerisinde olduğu bildirilmiştir. Su ve su ürünlerinde histamin seviyelerine yönelik yapılan bazı diğer çalışmalar Çizelge 3’te özetlenmiştir.

Çizelge 3: Farklı su ürünlerinde histamin düzeylerinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar

Ürün(ler)	Tespit Yöntemi	Bulgular	Referans
21 ton, 10 uskumru, 6 torik, 5 hamsi, 3 pasifik zurna ve 3 sütbalığı konservesi	HPLC; UV-Visible dedektör	6 farklı markadan 48 adet balık konservesinde histamin seviyeleri genellikle 5 mg/100 g’dan düşük bulunurken, bir hamsi ve bir ton balığı konservesinde FDA limitinin üzerinde histamin tespit edilmiştir	Tsai ve ark. [41]
12 balık sosu, 9balık ezmesi ve 6 karides ezmesi	HPLC; UV-Visible dedektör	İncelenen örneklerin %92,6’sının FDA limiti olan 50 ppm’den ve %25,9’unun 500 ppm’den daha yüksek miktarda histamin içerdiği	Tsai ve ark. [42]

Ton balıklı mantı	HPLC; UV-Visible dedektör	bulunmuştur. Tayvan'da ton balıklı mantı tüketimi sonucu 7 kişide zehirlenme görülmesi üzerine ilgili ürüne dair yapılan analiz sonucunda 50 mg/100 g olan yasal sınırın üzerinde histamin değerine (160,8 mg/100 g) rastlanmıştır.	Chen ve ark. [43]
Kılıç balığı filetosu	HPLC; UV-Visible dedektör	Tayvan'da kılıç balığı filetosu tüketimi sonucu 43 kişide zehirlenme görülmesi üzerine ilgili ürüne dair yapılan analiz sonucunda 50 mg/100 g olan yasal sınırın üzerinde histamin değerine (293,7 mg/100 g) rastlanmıştır.	Chang ve ark. [44]
Ton balıklı sandviç	HPLC; UV-Visible dedektör	Tayvan'da satılan 43 adet ton balıklı sandviç ürününde histamin miktarları incelenmiş ve 42 numunede sekiz farklı biyojen amin içeriği 3 mg/100 g'dan düşük bulunurken, bir örnekte histamin miktarı 5,21 mg/100g olarak tespit edilmiştir.	Kung ve ark. [45]
Kızartılmış balık (<i>Tetrapturus angustirostris</i>)	HPLC; UV-Visible dedektör	Tayvan'da 347 kişinin zehirlenmesi üzerine yapılan araştırma sonucunda 2 kızarmış balık numunesinden birinde yasal sınırın üzerinde histamin değerine (52,3 mg/100 g) rastlanmıştır.	Chen ve ark. [46]
Kurutulmuş balık	HPLC; UV-Visible dedektör	Tayvan'daki 46 adet kurutulmuş balık numunesi incelenmiş ve bu örneklerin %30,4'ünde histamin seviyesinin yasal sınırın üzerinde olduğu tespit edilmiştir.	Huang ve ark. [47]
Tuzlanmış su ürünleri (16 sardalya, 16 gümüş hamsi, 8 istiridyeye, 5 deniz tarağı, 7 kabuklu salyangoz ve 5 karides)	HPLC; UV-Visible dedektör	Tayvan'da satılan tuzlanmış su ürünlerinin %10,5'inde yasal limitlerin üstünde histamin miktarına rastlanmıştır.	Lin ve ark. [48]
Balık ve balık ürünleri	HPCL; Floresan dedektör	Almanya, Norveç, Kamboçya, Japonya, Fiji, Hollanda, Çin, Tayland orijinli 159 adet su ürününden 35 tanesinde %21'inde histamin tespit edilirken, 14 üründe 50 ppm üzerinde, 5 örnekte 500 ppm	Tao ve ark. [49]

Balık Nukazuke (tuzlama işlemi yapılmış balık ve pirinç kepeğiyle fermente edilmiş bir balık ürünü)	Histamin analiz kiti	üzerinde ve 2 örnekte 1000 ppm üzerinde histamin tespit edilmiştir. Japonya’da 10 balık nukazuke örneğinden 2 uskumru- ve 2 sardalya-nukazuke örneğinde 12,6 ile 30 mg/100 g aralığında yüksek histamin miktarları tespit edilmiştir.	Kuda ve ark. [50]
Donmuş konserve edilmiş, taze, donmuş balık	HPLC; Floresan dedektör	Umman’da incelenen 1133 adet donmuş, taze, kurutulmuş ve konserve edilmiş balık örneklerinden %3,7’sinde FDA (50 ppm), %0,79’unda ise AB (100 ppm) sınırlarının üzerinde histamin seviyelerine rastlanmıştır.	Yesudhason ve ark. [51]
Taze balık ve ürünü	ELISA ve HPLC	İtalya’dan temin edilen 311 taze balık ve balık ürününden %58’inde 2,5 ppm’den yüksek histamin seviyelerine rastlanırken, örneklerin %5’inde AB yasal sınırlarının üzerinde histamin seviyeleri bulunmuştur.	Muscarella ve ark. [52]
Ton balığı (taze ve konserve)	HPLC; Floresan dedektör	Brezilya’da satılan taze ve konserve ton balığı örneklerinin %46’sında histamin tespit edilse de yasal limitlerin üzerinde histamine rastlanmamıştır.	Silva ve ark. [53]

4. SONUÇ

Su ürünleri endüstrisinde, biyojen aminler hem kalite hem de güvenlik kriteri olarak kabul görmektedir. Biyojen aminler içerisinde histamin su ürünleri endüstrisi için özellikle önem taşımakta olup yüksek miktarlarda oluştuğu takdirde histamin zehirlenmesine yol açmaktadır. Histamin oluşumu, ürünün hasat yöntemine, maruz kaldığı proseslere, av sonrası kontaminasyona, yetersiz soğutma koşullarına ve sıcaklıktaki dalgalanmalara bağlıdır. Kısa sürelerde dahi olsa yüksek sıcaklıklara maruz kalan balıklarda mikroorganizma popülasyonu artabilir ve histidini histamine dönüştüren dekarboksilaz enzimleri üretebilir. Dahası, soğuk koşullarda mikroorganizma popülasyonu azalsa da enzim aktivitesi devam edeceğinden histidin miktarı artabilir ve zehirlenmeye yol açabilir. Bu sebeple, histaminin yanı sıra diğer biyojen aminlerin de seviyeleri mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Mevcut durumda, doğru hasat yöntemi, uygun proses ve muhafaza koşulları ve kontrol prosedürleri, hem ürünün kalitesi ve güvenliği hem tüketici sağlığı hem de su ürünleri endüstrisi açısından en etkili yöntem olarak kabul edilmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

E.B.: Araştırma, kaynaklar, derlemenin hazırlanması.

H.U.: Derlemenin hazırlanması, gözden geçirme ve düzenleme, orijinal taslağın hazırlanması.


KAYNAKLAR

- [1] Visciano, P., Schirone, M. ve Paparella, A. (2020). An overview of histamine and other biogenic amines in fish and fish products. *Foods*, 9, 1-15.
- [2] Bardócz, S. (1989). Polyamines in tissue regeneration, In U. Barhrach and Y.M. Heimer (Eds.), *Physiology of polyamines* (s. 96-106). Vol. 1, C.R.C. Press, Boca Raton, FL, U.S.A.
- [3] Yeğın, S. ve Üren, A. (2008). Gıdalarda biyojen amin oluşumunu etkileyen faktörler, Türkiye 10. Gıda Kongresi. 21-23 Mayıs, Erzurum.
- [4] Graf W. (1992). Untersuchungen zum vorkommen und zur bildungvon histamin in hartkaese, Dissertation med. Vet. MÜNCHEN.
- [5] Gökoğlu, N. ve Varlık, C. (1995). Sardalya konservelerinin histamin biyojen amini yönünden incelenmesi, *Gıda*, 5, 273-279.
- [6] Özdestand, Ö. (2009). Türkiye’de üretilen bazı fermente gıdalarda biyojen aminlerin belirlenmesi üzerine bir çalışma. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [7] Mafra, I., Herbert, P., Santos, L., Barros, P. ve Alves, A. (1999). Evaluation of biogenic amines in some portuguese quality wines by HPLC fluorescence dedection of OPA derivatives, *American Journal of Enology and Viticulture*, 50(1), 128-132.
- [8] Azim, Ö. (2002). Gıdalarda Yüksek Basınç Sıvı Kromatografisi (HPLC) ile Biyojen Amin Analizleri. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [9] Shalaby, A.R. (1996). Significance of biogenic amines to food safety and human health. *Food Research International*, 29, 675-690.
- [10] Özoğul, F., Küley, E. ve Özoğul, Y., (2004). Balık ve balık ürünlerinde oluşan biyojenik aminler, *Ege Üniversitesi Su Ürünleri Dergisi*, 21 (3-4), 375-381.
- [11] Özdestand, Ö. (2013). Peynirde biyojen aminler, *Analiz 35 Dergisi*, 18, 42-47.
- [12] Vatansver, L. (2004). Et ve et ürünlerinde biyojenik aminler. *Kafkas Üniversitesi Veterinerlik Fakültesi Dergisi*, 10, 203-208.
- [13] Yerlikaya, P. ve Gökoğlu, N. (2002). Gıdalarda biyojen aminler ve önemi. *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Gıda Mühendisliği Dergisi*, 6, 24-30.
- [14] Bardócz, S. (1995). Polyamines in food and their consequences for food quality and human health. *Trends in Food Science and Technology*, 6, 341–346.
- [15] Ünlütürk, A. ve Ünlütürk, Y. (1981). Gıdalarda histamin oluşumu ve histamin zehirlenmesi. *Gıda*, 6(1), 15:30.
- [16] Yayla, D. (2019). Ton balığı konservelerinde histamin varlığının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Kafkas Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Kars.
- [17] Turan, D. Ve Fidancı, U. R. (2016). Balık ve balık ürünlerinde histamin düzeylerinin tespiti için o-fitaldialdehit ve benzoil klorür türevlendirmesi kullanılan yüksek performans sıvı kromatografisi yöntemlerinin karşılaştırılması. *Ankara Üniversitesi Veterinerlik Fakültesi Dergisi*, 63, 93-101.

- [18] Taylor, S. L. (1986). Histamine food poisoning: toxicology and clinical aspects. *Critical Reviews in Toxicology*, 17(2), 91–128.
- [19] Flick, G. J., Oria, M. P. ve Douglas, L. (2001). Potential hazards in cold-smoked fish: biogenic amines. *Journal of Food Science*, 66(7), 1088-1099.
- [20] Hungerford, J. M. (2010). Scombroid poisoning: A review. *Toxicon*, 56, 231–243.
- [21] Ijomah, P., Clifford, M.N., Walker, R., Wright, J., Hardly, R. ve Murray, C.K. (1992). Further volunteer studies on scombrototoxicosis. In J. R. Burt, R. Hardly and K. J. Whittle (Eds.), *Pelagic fish: the source and its exploitation* (s.194-199). Vol 17, Oxford.
- [22] Yoshida, A. ve Nakamura, A. (1982). Quantitation of histamine in fish and fish products by high performance liquid chromatography, *Food Hygiene and Safety Science in Japan*, 23(4), 339-343.
- [23] Mackie, I. M., Pirie, L., Ritchie, A.H. ve Yamanaka, H. (1997). The formation of non-volatile amines in relation to concentration of free basic amino acid during postmortem storage of the muscle of scallop (*Pecten maximus*), herring (*Clupea harengus*) and mackerel (*Scomber scombrus*), *Food Chemistry*, 60(3), 291-295.
- [24] Veciana-Nogues, M.T., Marine-Font, A. ve Vidal-Carou, M. C. (1997). Biogenic amines in fresh and canned tuna. effects of canning on biogenic amine contents, *Journal of Agricultural and Food Safety*, 45, 4324-4328.
- [25] Mitchell, J. (1993). Scombrototoxic fish poisoning, Report for the Ministry of Health, Wellington.
- [26] Öztürk, S., Çalışkaner, Z., Güleç, M., Göçgeldi, E. ve Kutlu, A. (2008). Kronik ürtiker ve anjiödemde biyojenik aminlerin rolü. *Tıp Araştırmaları Dergisi*, 6(3), 163 -167.
- [27] Prester, L. (2011). Biogenic amines in fish, fish products and shellfish: a review. *Food Additives and Contaminants*, 28(11), 1547–1560.
- [28] Oz, E. (2021). The presence of polycyclic aromatic hydrocarbons and heterocyclic aromatic amines in barbecued meatballs formulated with different animal fats. *Food Chemistry*, 352, Article no: 129378.
- [29] Ozcan, C., Kanburoglu Cebi, U., Gurbuz, M.A., Ozer, S. (2017). Residue analysis and determination of IMI herbicides in sunflower and soil by GC–MS. *Chromatographia*, 80, 941-950.
- [30] Sungur, Ş., Jobasi, D. (2022). Determination of biogenic amines in some cheese consumed in Hatay region. *Natural and Engineering Sciences*, 7(2), 120-130.
- [31] Kus, S., Gogus, F., Eren, S. (2005). Hydroxymethyl furfural content of concentrated food products. *International Journal of Food Properties*, 8, 367-375.
- [32] Brillantes, S. ve Samosorn, W. (2001). Determination of histamine in fish sauce from Tailand using a solid phase extraction and high performance liquid chromatography. *Fisheries Science*, 67, 1163-1168.
- [33] Özdestandan, Ö. ve Üren, A. (2012). Gıdalarda biyojen aminlerle ilgili yasal düzenlemeler. *Gıda ve Yem Bilimi-Teknoloji Dergisi* 12, 27-40.
- [34] Anonim, (2008). Su ürünleri yönetmeliği, No: 2008/27004, Ek-9, Türkiye Cumhuriyeti, Tarım ve Köyişleri Bakanlığı, Koruma ve Kontrol Genel Müdürlüğü.
- [35] Tan, A., Zhao, Y., Sivashanmugan, K., Squire, K. ve Wang, A. (2019). Quantitative TLC-SERS detection of histamine in seafood with support vector machine analysis. *Food Control*, 103, 111-118.
- [36] Lin, C.S., Kung, H.F., Lin, C.M., Tsai, H.C. ve Tsai, Y.H. (2015). Histamine production by *Raoultella ornithinolytica* in mahi-mahi meat at various storage temperatures, *Journal of food and drug analysis*, 1-6.
- [37] Duyar H. A. ve Ekici K. (2011). Balık konservelerinde histamin ve pH düzeylerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 22(2), 71 - 74.
- [38] Karsandı A. ve Bilgin Ş. (2016). Satışa sunulan bazı su ürünlerinin biyojen amin düzeylerinin araştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Eğirdir Su Ürünleri Fakültesi Dergisi*, 12(2), 119-127.
- [39] Kızanlık P. K., Şahiner C. ve Göksoy E. Ö. (2019). Aydın ili pazar yerlerinde satışa sunulan balıklarda bulunan histamin düzeylerinin belirlenmesi. *Animal Health, Production and Hygiene*, 8(2), 663-667.

- [40] Su Ürünleri Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik. Resmi Gazete. 21 Eylül 2008 Pazar. Sayı 27004.
- [41] Tsai, Y.H., Kung, H.F., Lee, T.M., Chen, H.C., Chou, S.S., Wei, C.I. ve Hwang, D.F. (2005). Determination of histamine in canned mackerel implicated in a food borne poisoning. *Food Control*, 16, 579-585.
- [42] Tsai, Y.H., Lin, C.Y., Chien, L.T., Lee, T.M., Wei, C.I. ve Hwang, D.F. (2006). Histamine contents of fermented fish products in Taiwan and isolation of histamine-forming bacteria. *Food Chemistry*, 98, 64-70.
- [43] Chen, H.C., Kung, H.F., Chen, W.C., Lin, W.F., Hwang, D.F., Lee, Y.C. ve Tsai, Y.H. (2008). Determination of histamine and histamine-forming bacteria in tuna dumpling implicated in a food-borne poisoning. *Food Chemistry*, 106, 612-618.
- [44] Chang, S.C., Kung, H.F., Chen, H.C., Lin, C.S. ve Tsai, Y.H. (2008). Determination of histamine and bacterial isolation in swordfish fillets (*Xiphias gladius*) implicated in a food borne poisoning. *Food Control*, 19, 16-21.
- [45] Kung, H.F., Wang, T.Y., Huang, Y.R., Lin, C.S., Wua, W.S., Lin, C.M. ve Tsai, Y.H. (2009). Isolation and identification of histamine-forming bacteria in tuna sandwiches. *Food Control*, 20, 1013-1017.
- [46] Chen, H.C., Huang, Y.R., Hsu, H.H., Lin, C.S., Chen, W.C., Lin, C.M. ve Tsai, Y.H. (2010). Determination of histamine and biogenic amines in fish cubes (*Tetrapturus angustirostris*) implicated in a food-borne poisoning. *Food Control*, 21, 13-18.
- [47] Huang, Y.R., Liu, K.J., Hsieh, H.S., Hsieh, C.H., Hwang, D.F. ve Tsai, Y.H. (2010). Histamine level and histamine-forming bacteria in dried fish products sold in Penghu Island of Taiwan. *Food Control*, 21, 1234-1239.
- [48] Lin, C.S., Liu, F.L., Lee, Y.C., Hwang, C.C. ve Tsai, Y.H. (2012). Histamine contents of salted seafood products in Taiwan and isolation of halotolerant histamine-forming bacteria. *Food Chemistry*, 131, 574-579.
- [49] Tao, Z., Sato, M., Zhang, H., Yamaguchi, T. ve Nakano, T. (2011). A survey of histamine content in seafood sold in markets of nine countries. *Food Control*, 22, 430-432.
- [50] Kuda, T., Mihara, T. ve Yano, T. (2007). Detection of histamine and histamine-related bacteria in fish-nukazuke, a salted and fermented fish with rice-bran, by simple colorimetric microplate assay. *Food Control*, 18, 677-681.
- [51] Yesudhasan, P., Al-Zidjali, M., Al-Zidjali A., Al-Busaidi, M., Al-Waili, A., Al-Mazrooei, N. ve Al-Habsi, S. (2013). Histamine levels in commercially important fresh and processed fish of Oman with reference to international standards. *Food Chemistry*, 140, 777-783.
- [52] Muscarella, M., Magro, S.L., Campaniello, M., Armentano, A. ve Stacchini, P. (2013). Survey of histamine levels in fresh fish and fish products collected in Puglia (Italy) by ELISA and HPLC with fluorimetric detection. *Food Control*, 31, 211-217.
- [53] Silva, T.M., Sabaini, P.S., Evangelista, W.P. ve Gloria, M.B.A. (2011). Occurrence of histamine in Brazilian fresh and canned tuna. *Food Control*, 22, 323-327.

Topoloji Optimizasyonu ile Metal Eklemeli İmalat Yönteminin Endüstriyel Uygulamaları

Melih Canlıdınç ^{1*} 

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye

Geliş: 13.12.2023, Kabul: 19.12.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

ÖZ

Metal eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemleriyle mümkün olmayan karmaşık metal yapıları üretme kapasitesiyle yenilikçi üretim süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Topoloji optimizasyonu ise, belirlenen tasarım alanlarında hedeflenen parametreleri en uygun şekilde dağıtarak malzeme verimliliğini artırır. Bu çalışma, metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun endüstriyel uygulamalarını derinlemesine inceleyerek, bu teknolojilerin özellikle havacılık, medikal ve otomotiv sektörlerinde üretilebilirlik, işlevsellik ve tasarım özgürlüğü açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Havacılık sektöründe, uçak parçalarının hafifletilmesi ve yapısal bütünlüğün artırılmasında metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun birleşimi kritik öneme sahiptir. Medikal alanda, özelleştirilmiş implantlar ve kemik yapıları için bu yöntemlerin entegrasyonu, hastalara özel çözümler sunarak tedavi süreçlerini iyileştirmektedir. Otomotiv endüstrisinde ise, bu teknolojiler araçların performansını artırırken ağırlığını azaltarak enerji verimliliğini yükseltmektedir. Bu çalışma metal eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonunun endüstriyel uygulamadaki zorlukları ve sınırlamaları da ele almıştır. Ayrıca bu teknolojilerin gelecekteki gelişim yönlerini ve potansiyellerini detaylı bir şekilde ortaya koyarak, endüstriyel tasarımda yenilikçi yaklaşımların önünü açması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Metal eklemeli imalat; Topoloji optimizasyonu; Optimum tasarım

Industrial Applications of Metal Additive Manufacturing with Topology Optimization

ABSTRACT

Metal additive manufacturing plays a significant role in innovative manufacturing processes with its capacity to produce complex metal structures that are not feasible with traditional manufacturing methods. Topology optimization, on the other hand, enhances material efficiency by optimally distributing targeted parameters within designated design areas. This study thoroughly examines the industrial applications of metal additive manufacturing and topology optimization, demonstrating that these technologies offer significant advantages in terms of manufacturability, functionality, and design freedom, particularly in the aerospace, medical, and automotive sectors. In the aerospace sector, the combination of metal additive manufacturing and topology optimization is critically important for lightening aircraft parts and enhancing structural integrity. In the medical field, the integration of these methods for customized implants and bone structures offers patient-specific solutions, improving treatment processes. In the automotive industry, these technologies enhance vehicle performance while reducing weight, thereby increasing energy efficiency.

This study also addresses the challenges and limitations in the industrial applications of metal additive manufacturing and topology optimization. Furthermore, it elaborates on the future directions and potentials of these technologies, aiming to pave the way for innovative approaches in industrial design.

Keywords: Metal additive manufacturing; Topology optimization; Optimum design

1. GİRİŞ

Metal eklemeli imalat (MEİ), geleneksel süreçlerle üretimi zor olan geometrik olarak karmaşık, tamamen işlevsel metal yapıları gerçekleştirdiği için giderek artan bir ilgi çekmektedir [1-4]. Çoğu geleneksel imalat yöntemi, eklemeli imalat süreçleriyle oldukça mümkün olan parçaların topolojik tasarım karmaşıklıklarını sınırlar. Topoloji optimizasyonu (TO), belirlenmiş bir tasarım alanında bir hedef parametreyi bir veya bir dizi kısıtlamaya karşı optimize ederek en iyi malzeme veya yapısal düzeni kurar. TO'nun sunduğu bu tasarım özgürlüğü nedeniyle, karmaşık bir şekilde bağlantılı özelliklere sahip organik şekiller yaygındır. Diğer yapısal optimizasyon yöntemlerine kıyasla optimum tasarımlar elde edilebilirken, TO, bu tür tasarımları gerçekleştirmek için gerekli imalat tekniklerinin sınırlamaları nedeniyle geçmişte büyük ölçüde teorikti. Bu hızla değişmekte ve son on yılda, eklemeli imalat süreçlerinin ilerlemesi nedeniyle çeşitli bileşenlerin tasarım akışında TO'yu dikkate alma çabaları büyük ölçüde artmıştır. Araştırmacılardan bazıları eklemeli imalatın imalat süreçleri üzerine çalışmışlardır [5]. Bir diğer grup eklemeli imalat parçalarının mikroyapısı ve mekanik özelliklerini, maliyet modelleri ve eklemeli imalat süreçlerinin simülasyonu üzerine birkaç inceleme bulunmaktadır [6-9].

Bu çalışmada topoloji optimizasyonu ve metal eklemeli imalatla üretimin endüstrideki uygulamaları göz önüne alınmıştır. Bu kapsamda, TO ve MEİ arasındaki ortaklığın, iyileştirilmiş işlevsellikler, imalat kolaylığı ve genel tasarım ifadesi özgürlüğü için endüstriye özgü tasarım uygulamalarına ne derece yardımcı olduğu tartışılmaktadır.

2. ENDÜSTRİYEL TASARIM VE UYGULAMALAR

Endüstriyel tasarım ve üretimin amacı, bireysel veya ticari piyasa ihtiyaçlarını karşılamaktır. Bu ihtiyaçların çeşitliliği, birçok geleneksel ve/veya konvansiyonel üretim süreci tarafından ele alınmış olsa da eklemeli imalat bazı ana endüstrilerde büyük uygulama alanı bulmuştur. Metal parçaların MEİ yöntemiyle üretim için tasarlanması ve üretiminin geliştirilmesi, diğer polimer bazlı süreçlerden farklı olarak benzersiz tasarım ve üretim süreçleriyle ilgili zorluklar sunmaktadır. TO, bu zorlukları ele almak için geçerli bir araç olmuştur, ancak bu algoritmaların bazıları henüz başlangıç aşamasındadır. Bu çalışma kapsamında, özel endüstriyel amaçlar için hedeflenen TO ve MEİ yöntemi kullanımı incelenmektedir.

2.1. Havacılık ve Uzay Sektörü

Bu bölümde, uçak ve uzay araçlarıyla ilgili yapıların topoloji optimizasyonu ele alınmıştır. Yapısal tasarımların ilerlemesinde eklemeli imalatın oynayabileceği rolü kısaca tartışmış olsalar da MEİ süreçleri üzerine detaylı bir tartışma yapılmamıştır. Ancak, yaptıkları önemli bir sonuç, TO'nun havacılık yapılarının tasarımı için yaygın olarak kabul edildiği, ancak üretilebilirlik noktasında endişeler barındırdığıdır [10].

Havacılık endüstrisinde TO ve MEİ arasındaki ortaklığı-ilişkiyi incelemek için çalışmalardan birinde, bir helikopterin ana vites kutusunu topolojik olarak optimize etmiş ve seçilen eklemeli imalat süreci olarak elektron ışını ile eritme (Ti-6Al-4V-malzeme) yöntemini tercih etmiştir [11]. Çalışmanın üç ana hedefi: ağırlık tasarrufu, parça birleştirmesi ve mekanik özellikler için gereksinimlerin karşılanmasıdır. Farklı başlangıç tasarım alanları kullanılarak iki optimizasyon çözümü elde edilmiş ve topolojileri yeniden yapılandırmak için ayrı yeniden tasarlama stratejileri kullanılmıştır. Dikkat çeken bir zorluk, topolojilerin yeniden yapılandırılmasındaki karmaşıklık ve zaman gereksinimidir. Yine de her iki optimizasyon durumunda yeniden yapılandırmadan sonra %40'ın üzerinde malzeme azaltımı başarmış ve diğer hedefleri de gerçekleştirmişlerdir. Bir başka çalışmada araştırmacılar hafif bir uçak braketini tasarlamak ve üretmek için TO ve lazerle toz yatağı füzyonu yöntemini kullanmışlardır [12]. Bu yöntemle üretilen parçalar, optimum süreç parametre seçimleri yapılmazsa elektron ışını ile eritmeye göre daha fazla gözeneklilik ve artık gerilimlere eğilimlidir; bu nedenle baskı sonrası sıcak izostatik presleme gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada braketin malzemesi alüminyum alaşımı-titanyum alaşımı değişiminde %28'lik bir ağırlık azalması sağlanmıştır. Başka bir çalışmada, türbin kanatları, hedef fonksiyon olarak gerilme enerjisi minimizasyonunu ve iki kısıtlamayı (malzeme hacminde çift azalma ve ilk 6 öz frekans üzerinde bir sınır) içeren bir TO formülasyonu ile tasarlanmıştır [13]. Düşük basınçlı türbinlerin tasarımında rezonans frekansını ayarlamak için öz frekansların kısıtlanması gereklidir. Türbin kanatlarının tomografisi nedeniyle, tasarımda üretim açısından zorluk oluşturabilecek çok ince özellikler olabileceği belirtilmelidir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, tasarım sırasında minimum özellik kalınlığı olarak 0.15 mm belirlenmiştir. Küçük boyutlu temsilci kanatlar, lazerle toz yatağı füzyonu aracılığıyla Nikel bazlı bir süper alaşımdan imal edilmiştir. Bir diğer çalışmada GE Uçak Motoru braketini, Doğrudan Metal Lazer Sinterleme kullanılarak yeniden tasarlanmış ve üretilmiştir [14]. Çalışmada Şekil 1'de gösterilen braketin önceki sürümlerinin ağırlığını, Ti-6Al-4V yerine Paslanmaz Çelik AISI 15-5PH kullanarak basılmış bir optimize alternatif ile azaltma amaçlanmıştır. Eklemeli imalat süreci için geometrik kısıtlamalara uygun olarak, TO sırasında minimum özellik boyutu sınırı olarak 9 mm belirlenmiş ve orijinal tasarımla yakın fonksiyonel gerilme ve deformasyon profillerini korurken %56'lık bir ağırlık azalması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1: Uçak braketlerinin geliştirilmesinde topoloji optimizasyonu ve metal eklemeli imalatın uygulama örneği [14].

TO ve MEİ'nin metal uçak bileşenleri için üretilebilirliği keşfetmeden kullanıldığı diğer çalışmalara örnekler, uçak iniş takımı ve motor montajı, tesla valfi ve uçak braketleri üzerinde görülebilir [15-18]. Uzayla ilgili uygulamalar için, bazı araştırmacılar tarafından TO ve MEİ kullanılarak aynaların tasarımı incelenmiştir [19]. Aynalar, uzay uçuşunda kullanışlı bir uygulama bulur, bu nedenle, iyi yapısal sertlik, kaliteli yüzey ve şiddetli titreşim etkilerine dayanabilme gibi kritik özellikler gerekiyordu. Bu doğrultuda, uygun yük ve sınır koşulları altında yerleştirilmiş bir başlangıç CAD dosyası, sertlik maksimizasyonu için optimize edilmiş ve bir malzeme hacmi ile 250 Hz. doğal frekans kısıtlaması altına alındı. Ayna, iki MEİ süreci Ti-6Al-4V ile elektron demet ergitme yöntemi ve AlSi10Mg ile doğrudan metal lazer sinterleme kullanılarak imal edilmiştir. Her iki malzemeyle de başarılı bir şekilde imal edilen aynalardan, daha az gözeneklilik ve daha iyi mikro pürüzlülükle alüminyum ayna daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Başka bir uzay aynası yine topoloji ve boyutlandırma optimizasyonu ile geliştirilmiştir [20]. Bir diğer çalışmada araştırmacılar, ay uzay aracının bir maket çerçevesini (4 ayak ve bir merkezden oluşan) tasarladı ve üretti [21]. Optimize edilmiş çerçeve, AlSi10Mg malzeme kullanarak EOS M290 3B yazıcı ile imal edildi ve çerçevenin makineye göreli boyutu nedeniyle, 4 tane aynı ayak tasarlandı. Kullanılan optimizasyon yazılımının sınırlamaları nedeniyle, optimize edilmiş topolojinin CAD yorumu, son optimizasyon FEA'sı, destek minimizasyonu ve genel basılabilirlik için gereklidir.

Havacılık endüstrisinin kritik bir yönü, hava/uzay araçları ve motor/motor parçaları, yapısal çerçeveler gibi önemli bileşenlerin sertifikasyonu ve standardizasyonudur ki bu süreçler genellikle zaman almaktadır. Sertifikasyon ve standardizasyon olmadan, bu bileşenler başarısızlığa eğilimli olup, felaketlere ve kayıplara yol açabilir. Konuyla ilgili olarak bir araştırmacı, eklemeli imalat parçalarının sertifikasyonu ve standardizasyonunun, birçok sınırlamadan dolayı hava aracı endüstrisi için en zor aşama olduğunu belirtti ki bu, mevcut imalat teknolojisinin gelişimi olarak özetlenebilir [22]. MEİ teknolojisi hala gelişmekte olduğundan, eklemeli imalat malzemeleri, süreçler, kalite kontrolü, değerlendirme ve tasarım için yaygın

olarak kabul edilebilir standartlar elde etmek hala önemli bir eksiktir. Bu, birçok yeni tasarlanmış havacılık bileşeninin homologasyonunu engelleyen ana etkenlerden biridir. Bu konuda ülkemizde Hava Aracı ve Parçası Sertifikasyonu Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır.

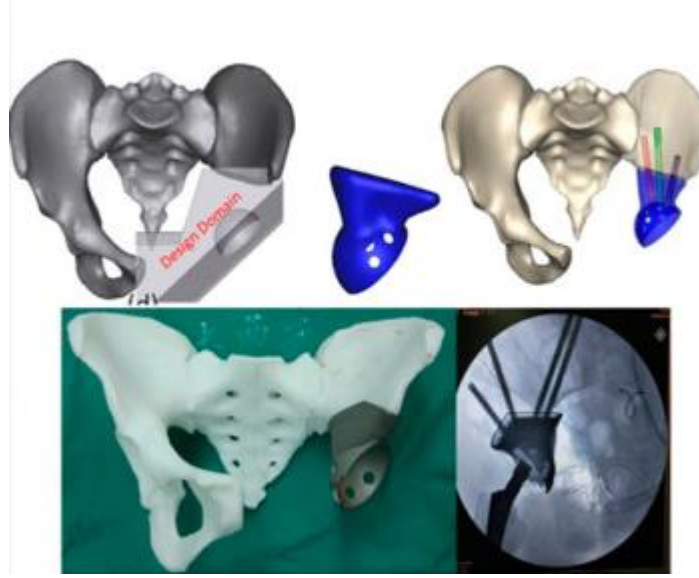
2.2. Medikal Sektörü

Geçtiğimiz 10 yılda, tıbbi amaçlar için eklemeli imalatın ihtiyacı ve önemi büyük ölçüde artmıştır. Bu sektördeki çakışmaları incelersek, Dr. Jules Poukens ve ekibi, dünyanın ilk eklemeli imalatla üretilmiş mandibulasını (çene kemiğini) bir hastaya yerleştirmiştir [23]. Bu gelişme, tıbbi implantların tasarımı ve üretimi açısından birçok yönden önemlidir, çünkü hasta özelleştirilmiş implantlar veya hastanın kemiğine yakın mekanik ve geometrik özelliklere sahip ızgara tabanlı implantlar gibi fırsatlar sunmuştur [24-27]. Kafes yapılı tasarım dışında, hasta özelleştirilmiş implantlar tasarlamının popüler bir yaklaşımı TO kullanımıdır. İmplantların ve kemik doku mühendisliğinin tasarımında, kemik yeniden şekillenmesi, kemik yapısının dış yük koşullarını yeterince destekleyebilmesi için iç yapısının uyum sağlaması gereken temel bir yönüdür. Bunu başarmak için, implant yapısının yapısal sertliği maksimize etmek için optimal olarak yeniden tasarlanması gerekmektedir [26,28,29]. Ek olarak, uygun olmayan bir kemik-implant montajında meydana gelen istenmeyen bir fenomen, gerilme korumasıdır; burada komşu kemik bölgesine göre çok daha sert bir implant, yanlış kemik yeniden şekillenmesine yol açmaktadır [30].

Birçok çalışma, bu yönleri ele almak için TO ve MEİ birlikte kullanmıştır. Bir araştırmada, kemik kırıklarının tedavisinde metalik kemik plakalarının yeniden tasarımını incelemiştir [31]. Gerilme koruması ile mücadele etmek için, plakalar kortikal kemiğe benzer bir sertlik elde etmek üzere topolojik olarak optimize edilmiştir. Optimize edilen plakalar, Ti-6Al-4V kullanılarak Elektron Demet Ergitme Yöntemi yoluyla imal edilmiştir ve gerilme, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerini gözlemlemek için birkaç karakterizasyon yapılmıştır. Gerilme testlerinin sonuçları, sayısal sonuçlarla yakın eşleşmeler göstermiştir. Plakaların in-vitro testlerini, çevreleyen dokularla biyolojik bağın hızını ve kalitesini anlamak için yapılmış ve Elektron Demet Ergitme Yöntemi plakalarının pürüzlü yüzeylerinin, ticari olarak üretilen daha pürüzsüz plakalara kıyasla daha iyi bağlanmaya katkıda bulunduğunu tespit etmişlerdir. Benzer bir yaklaşımla, TO optimizasyonu ve kafes tasarımının bir kombinasyonu aracılığıyla lazerle toz yatağı füzyonu ile üretilmiş Ti-6Al-4V kalça protezindeki gerilme koruması ile mücadele edilmiştir [32]. Başka bir çalışmada her ne kadar in-vitro biyolojik test yapılmamış olsa da, optimize edilmiş tasarımda gerilme koruması artışının %50'den fazla azaldığı ve eşdeğer implantlara kıyasla 107 ömür döngüsünden daha uzun süre dayanabileceği fark edilmiştir [33,34].

Bir araştırmada tarafından bir pelvik implantı tasarlamak için çok amaçlı bir TO modeli kullanılmıştır [35]. Bu tasarım stratejisi, farklı doku alınması türlerinden elde edilen dört başlangıç tasarım alanı için yerine

getirilmiştir. Şekil 2’deki implant, Ti-6Al-4V kullanılarak Elektron Demet Ergitme Yöntemi ile üretilerek bir hastaya yerleştirilmiştir.



Şekil 2: Topoloji optimizasyonu ve metal eklemeli imalatı tıpta başlıca uygulamaları: pelvik ve kalça örneği [35].

Bazı zorluklar ve varsayımlar, daha az gerçekçi statik yükleme koşullarının benimsenmesi, bağlayıcı kaslar ve bağların etkilerinin dışlanması ve deneysel mekanik test doğrulamaları olmadan sadece sayısal analize dayalı performans değerlendirmesi olmuştur. Gelecekteki gelişmeler için, sayısal model, doğal fizyolojik rutinle daha yakından eşleşecek dinamik yükleme girdileri kullanılarak güçlendirilebilir.

2.3. Otomotiv Sektörü

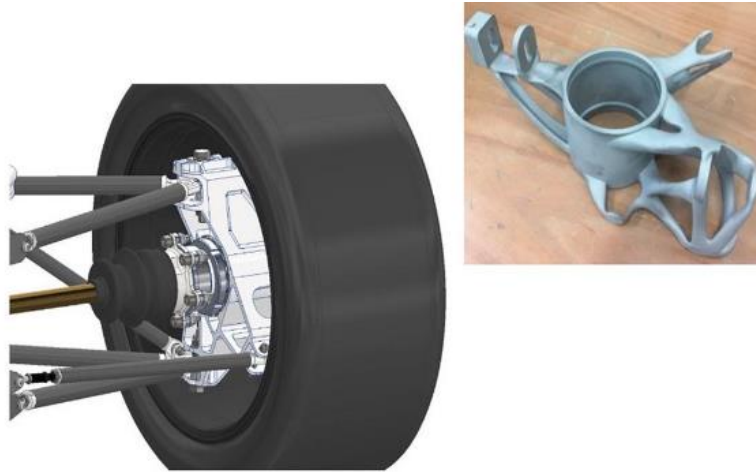
Otomobillerin verimliliklerini artırmak amacıyla, turbo şarj, daha iyi emisyon kontrolü, yakıt tüketimi, gelişmiş frenleme, direksiyon ve süspansiyon sistemleri gibi birçok gelişmiş teknik geliştirilmiştir. Bu teknolojileri gerçekleştirmek için, ileri yaklaşım sunan tasarım ve üretim tekniklerinin benimsenmesi gerekmektedir. Birçok araştırma, bu otomobil bileşenleri ve sistemleri için tasarım akışlarına TO ve MEİ’yi dahil etmeye başlamaktadır.

Birçok çalışmada süspansiyon/tekerlek sistemi ve motor etrafındaki parçalara odaklandığı gözlemlenmektedir. Bazı çalışmalarda, Formula yarış arabaları için tekerlek poyraları veya dikmeleri incelemiştirler [36,37]. Bir çalışmada lazerle toz yatağı füzyonu kullanarak AlSi10Mg ile basılmış topoloji optimize edilmiş örnekler üretilirken, diğer çalışmada sırasıyla elektron ışını ile ergitme ve lazerle toz yatağı füzyonu kullanarak Ti-6Al-4V ile optimize edilmiş örnekler üretmişlerdir [38-40]. Bu çalışmalarda, iyi performanslar korunurken önemli ağırlık tasarrufları elde edilmiştir, ancak maliyet açısından

değerlendirildiğinde Walton'un çalışmasında, elektron ışını ile ergitmeyle işlenmiş alternatifte karşı maliyeti %700'den fazlaydı [37].

Bir çalışmada Catia'nın 3DExperience'ında parça simülasyonu, baskı hazırlığı ve süreç simülasyonu için birkaç iş akışını araştırılmıştır [36]. MEİ'yi diğer üretim süreçleriyle karşılaştıran çalışmalar için, lazerle toz yatağı füzyonu yoluyla üretilmiş topolojik olarak optimize edilmiş bir perçinleme aracını, frezeleme için kısıtlanmış optimize edilmiş bir versiyonu ve orijinal frezelenmiş bir versiyonu karşılaştırmıştır [41]. Diğerleri arasında, ağırlıkları, üretim maliyetleri, zamanı, simüle edilen maksimum yer değiştirmeleri, eşdeğer gerilmeleri ve atık malzeme karşılaştırmıştır. Optimize edilmiş MEİ parçası, ağırlık, atık malzeme ve eşdeğer gerilme açısından diğerlerinden daha iyi performans gösterdiğini; ancak, üretim zamanı ve maliyeti açısından daha az performans gösterdiğini elde etmişlerdir.

Bir başka çalışmada lazerle toz yatağı füzyonu kullanarak Ti-6Al-4V ile basılmış ön ve arka fren kaliperlerini yeniden tasarlanmıştır, diğerinde ise bir süspansiyon salıncak bağlantısını topolojik olarak optimize etmişler ve bunun MEİ için iyi bir aday olduğu görüşüne varmışlardır [42]. Bu çalışmada TO aracılığıyla bir fren montajını yeniden tasarlamış ve prototip üretmişlerdir. İyileştirmeler ve düzeltmelerden sonra, son parça AlSi10Mg kullanarak lazerle toz yatağı füzyonu ile imal edilmiştir. Çalışmada, fren montajındaki ağırlık azalması ile karbon ayak izi arasındaki ilişki kurulmuş ve 81 g'lık bir kütle azalmasının 855 mg/100 km CO2 azalmasına yol açabileceği tahmin edilmiştir [43]. Diğer çalışmalarda AlSi10Mg kullanılarak lazerle toz yatağı füzyonu ile basılmış vites kutusu gövdesi yeniden tasarımı, yarış arabası dikmesi tasarımı, dizel motor desteği ve otomotiv Şekil 3'teki direksiyon sütunu desteği çalışmaları yapılmıştır [44-47].



Şekil 3: Otomotiv endüstrisinde topoloji optimizasyonu ve metal eklemeli imalat uygulamaları: direksiyon sütunu tasarımı örneği [45].

2.4. Diğer Sektörel Uygulamalar

Birçok diğer endüstri sektöründe de TO ve MEİ'nin ortak ilişkisinden yararlanmıştır. Bu çalışmalarını incelediğimizde 2007 yılındaki bir araştırmada, eksenel simetrik bileşenlerin malzeme azaltma ve gerilme kısıtlı TO süreci kullanılarak tasarımını bildirmiştir [48]. Tasarım stratejisi, fren diskleri, volanlar, basınç kapları vb. gibi bir dizi bileşen için uygun olduğu belirtilmiştir. Optimizasyonla tasarımın bir prototipi SLS kullanılarak plastik malzeme ile imal edilse de metalik malzemelerin kullanılabilceği ve simülasyon sırasında kullanılan karbon çeliğe benzer özelliklere sahip olacağı bildirilmiştir. Bir başka araştırmada 7-serbestlik dereceli ExoArm tasarımında bileşenlerin ağırlığının sürücülerdeki güce olumsuz etkisini iyileştirmek için parçaları hafifletme düşünülmüştür [49]. İlk olarak, orijinal malzeme özelliği Ti-6Al-4V, ağırlık azaltma için 7075 alüminyum ve çelikle değiştirildi. Daha sonra, ExoArm kelepçelerinin ağırlıklarını daha da azaltmak için TO ve kafes yapıları uygulandı. Kelepçeler, lazerle toz yatağı füzyonu kullanılarak imal edilerek, optimize edilen tüm parçalar için %45 ve üzerinde bir malzeme azalması elde edildi.

TO ve MEİ, inşaat endüstrisinde de araştırılmıştır. Bir araştırmada, eklemeli imalatla üretilmiş topoloji optimize edilmiş tübüler bağlantıların performansını, boş kare kesitli kaynaklı muadilleriyle karşılaştırılmıştır [50]. Birkaç mekanik test yapıldı ve bazı önemli sonuçlar şunlardır: basılmış ve kaynaklı tübüler bağlantılar arasında Young Modülünde %1.6'lık bir fark, basılmış bağlantılar kaynaklı bağlantılara göre daha simetrik gerilme dağılımları sağladı, maksimum gerilme, basılmış parçaları tasarlamak için TO kullanıldığında %49 azaldığını tespit ettiler. Bir başka çalışmada TO kullanarak, soğuk püskürtmeli eklemeli imalatla üretilecek parçaların tasarımı ve optimizasyonu için bazı kılavuzlar önerilmiştir [51]. Tasarım kılavuzları arasında düz yüzeylerin, sürekli püskürtme için yüzeyler arasındaki düzgün geçişlerin, birikim açısının ve kesit geometrisinin, soğuk püskürtme parametrelerine dayalı özellik kalınlığı sınırlamalarının vb. dikkate alınması yer almıştır. Bir diğer çalışmada, termo-mekanik bir TO modeli ve kafes yapılar kullanarak plastik enjeksiyon aracının yeniden tasarımı üzerinde çalışılmıştır [52]. Farklı bir çalışmada araştırmacılar, akustik ayarlanabilirliği olan bir meta-malzeme TO modeli ile insansız bir su altı aracının yeniden tasarımını incelemiştir [53].

3. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu çalışmada, topoloji optimizasyonu ve metal eklemeli imalatın birlikte kullanılmasıyla elde edilen tasarım ve ürünlerin sektörel olarak kullanımı ve gelişimiyle ilgili çalışmalar hakkında bilgi sunulmuştur. TO'nun faydalarıyla birlikte, MEİ'nin iki önemli zorluğu: eklemeli imalat teknolojilerinin yüksek maliyeti (özellikle lazer ve elektron ışını teknolojileri hem başlangıç hem de işletme maliyetleri) ve sınırlı inşa hacimleriyle limitli üretim hızları ele alındığında gelişen teknolojik gelişmelerle ve özel ihtiyaçlarla birlikte daha fazla

endüstride yaygın olarak benimsenmesi beklenmektedir. Bu limitlemelerden bazıları için güncel bazı çalışmalarda bu zorlukların çoklu lazerli toz yataklı füzyon sistemlerinin tanıtımıyla ele alındığını gösterdiler [53,54]. Orta üretim hacimli tek lazerli bir sistemden büyük üretim hacimli dört lazerli bir sisteme geçilerek, bir kontrol kolunun üretim oranlarının neredeyse %100 arttığını ve maliyetlerin neredeyse %50 azaldığını gösterdiler. Araştırılan büyük endüstriler ve diğerleri arasında birçok vaka çalışması için, işlevsellik açısından deneysel doğrulama çalışmaları sınırlıdır. Üretilecek parçaların işlevsellik açısından MEİ için uygunluğunun, maliyet ve üretilebilirlikle birlikte değerlendirilmesi önemlidir. Uygulamaya bağlı olarak, sertlik/güç, frekans, ısı transferi, basınç düşüşü, yüzey pürüzlülüğü vb. gibi yaygın işlevsellikler araştırılmalı ve geleneksel üretim süreçleriyle yapılan karşıt tasarımların performanslarına karşı değerlendirilmelidir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] A. Bacciaglia, A. Ceruti, and A. Liverani, "Additive Manufacturing Challenges and Future Developments in the Next Ten Years," in *Design Tools and Methods in Industrial Engineering*, pp. 891–902, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-31154-4_76.
- [2] B. Blakey-Milner et al., "Metal Additive Manufacturing in Aerospace: A Review," *Materials and Design*, vol. 209, 110008, 2021. doi: 10.1016/j.matdes.2021.110008.
- [3] T. Pan, S. Karnati, and F. Liou, "General Rules for Pre-Process Planning in Powder Bed Fusion System—A Review," in *Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—an Additive Manufacturing Conference, SFF 2018*, pp. 1161–1173, 2020b.
- [4] T. DebRoy et al., "Additive Manufacturing of Metallic Components—Process, Structure and Properties," *Progress in Materials Science*, vol. 92, pp. 112–224, 2018. doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
- [5] Y. Kok et al., "Anisotropy and Heterogeneity of Microstructure and Mechanical Properties in Metal Additive Manufacturing: A Critical Review," *Materials and Design*, vol. 139, pp. 565–586, 2018. doi: 10.1016/j.matdes.2017.11.021.
- [6] A. Gisario et al., "Metal Additive Manufacturing in the Commercial Aviation Industry: A Review," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 53, pp. 124–149, 2019. doi: 10.1016/j.jmsy.2019.08.005.
- [7] A. Bandyopadhyay and K. D. Traxel, "Invited Review Article: Metal-Additive Manufacturing—Modeling Strategies for Application-Optimized Designs," *Addit Manuf*, vol. 22, pp. 758–774, 2018. doi: 10.1016/j.addma.2018.06.024.
- [8] S. Srivastava et al., "Measurement and Mitigation of Residual Stress in Wire-Arc Additive Manufacturing: A Review of Macro-Scale Continuum Modelling Approach," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, no. 5, pp. 3491–3515, 2020a. doi: 10.1007/s11831-020-09511-4.

- [9] S. M. Hashemi et al., "Computational Modelling of Process–Structure–Property–Performance Relationships in Metal Additive Manufacturing: A Review," *International Materials Reviews*, pp. 1–46, 2021. doi: 10.1080/09506608.2020.1868889.
- [10] J. Zhu, H. Zhou, C. Wang, L. Zhou, S. Yuan, and W. Zhang, "A Review of Topology Optimization for Additive Manufacturing: Status and Challenges," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 34, no. 1, pp. 91–110, 2021b. doi: 10.1016/j.cja.2020.09.020.
- [11] M. Süß et al., "Aerospace Case Study on Topology Optimization for Additive Manufacturing," *DDMC 2016 Proceedings*, March 2016: 6.
- [12] M. Seabra et al., "Selective Laser Melting (SLM) and Topology Optimization for Lighter Aerospace Components," *Procedia Structural Integrity*, vol. 1, pp. 289–296, 2016. doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.039.
- [13] L. Magerramova, B. Vasilyev, and V. Kinzburskiy, "Novel Designs of Turbine Blades for Additive Manufacturing," in *Volume 5C: Heat Transfer*. American Society of Mechanical Engineers, 2016. doi: 10.1115/gt2016-56084.
- [14] J. D. López-Castro et al., "Topological Optimization and Manufacturing by Direct Metal Laser Sintering of an Aeronautical Part in 15-5PH Stainless Steel," *Procedia Manuf*, vol. 13, pp. 818–824, 2017. doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.121.
- [15] D. J. Munk, D. J. Auld, G. P. Steven, and G. A. Vio, "On the Benefits of Applying Topology Optimization to Structural Design of Aircraft Components," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 60, no. 3, pp. 1245–1266, 2019. doi: 10.1007/s00158-019-02250-6.
- [16] A. Gaymann, F. Montomoli, and M. Pietropaoli, "Design for Additive Manufacturing: Valves Without Moving Parts," in *Volume 2C: Turbomachinery*. American Society of Mechanical Engineers, 2017. doi: 10.1115/gt2017-64872.
- [17] A. W. Gebisa and H. G. Lemu, "A Case Study on Topology Optimized Design for Additive Manufacturing," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 276, 12026, 2017a. doi: 10.1088/1757-899x/276/1/012026.
- [18] K. V. Fetisov and P. V. Maksimov, "Topology Optimization and Laser Additive Manufacturing in Design Process of Efficiency Lightweight Aerospace Parts," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1015, 52006, 2018. doi: 10.1088/1742-6596/1015/5/052006.
- [19] H. Herzog et al., "Optical Fabrication of Lightweighted 3D Printed Mirrors," in *Optomechanical Engineering 2015*. SPIE, 2015. doi: 10.1117/12.2188197.
- [20] R. Hu et al., "Design Optimization Method for Additive Manufacturing of the Primary Mirror of a Large-Aperture Space Telescope," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 30, no. 3, 4016093–4000000, 2017. doi: 10.1061/(asce)as.1943-5525.0000690.
- [21] M. E. Orme et al., "Designing for Additive Manufacturing: Lightweighting Through Topology Optimization Enables Lunar Spacecraft," *Journal of Mechanical Design*, vol. 139, no. 10, 2017. doi: 10.1115/1.4037304.
- [22] S. Singamneni et al., "Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review," *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering*, vol. 8, no. 1, 13, 2019. doi: 10.4172/2329-6542.1000214.
- [23] Xillo, "The World's First 3D Printed Total Jaw Reconstruction," 2011. Available: <https://www.xilloc.com/patients/stories/total-mandibular-implant/>.
- [24] M. Leary, "Design of Titanium Implants for Additive Manufacturing," in *Titanium in Medical and Dental Applications*, edited by F. H. Froes and M. Qian. Elsevier Inc., 2018. doi: 10.1016/B978-0-12-812456-7.00009-3.

- [25] D. Shidid, M. Leary, P. Choong, and M. Brandt, "Just-in-Time Design and Additive Manufacture of Patient-Specific Medical Implants," *Physics Procedia*, vol. 83, pp. 4–14, 2016. doi: 10.1016/j.phpro.2016.08.002.
- [26] X. Wang et al., "Topological Design and Additive Manufacturing of Porous Metals for Bone Scaffolds and Orthopaedic Implants: A Review," *Biomaterials*, vol. 83, pp. 127–141, 2016. doi: 10.1016/j.biomaterials.2016.01.012.
- [27] G. Reinhart and S. Teufelhart, "Load-Adapted Design of Generative Manufactured Lattice Structures," *Physics Procedia*, vol. 12, PART 1, pp. 385–392, 2011. doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.049.
- [28] S. Bose, S. Vahabzadeh, and A. Bandyopadhyay, "Bone Tissue Engineering Using 3D Printing," *Materials Today*, vol. 16, no. 12, pp. 496–504, 2013. doi: 10.1016/j.mattod.2013.11.017.
- [29] I. Goda et al., "Topology Optimization of Bone Using Cubic Material Design and Evolutionary Methods Based on Internal Remodeling," *Mechanics Research Communications*, vol. 95, pp. 52–60, 2019. doi: 10.1016/j.mechrescom.2018.12.003.
- [30] K. Haase and G. Rouhi, "Prediction of Stress Shielding Around an Orthopedic Screw: Using Stress and Strain Energy Density as Mechanical Stimuli," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 43, no. 11, pp. 1748, 2013. doi: 10.1016/j.combiomed.2013.07.032.
- [31] A. A. Al-Tamimi et al., "Topology Optimised Metallic Bone Plates Produced by Electron Beam Melting: A Mechanical and Biological Study," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, no. 1–4, pp. 195–210, 2019. doi: 10.1007/s00170-019-03866-0.
- [32] Y. He et al., "Solid-Lattice Hip Prosthesis Design: Applying Topology and Lattice Optimization to Reduce Stress Shielding from Hip Implants," in *2018 Design of Medical Devices Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2018. doi: 10.1115/dmd2018-6804.
- [33] H. Weinans, D. R. Sumner, R. Igloria, and R. N. Natarajan, "Sensitivity of Periprosthetic Stress-Shielding to Load and the Bone Density-Modulus Relationship in Subject-Specific Finite Element Models," *Journal of Biomechanics*, vol. 33, no. 7, pp. 809–817, 2000. doi: 10.1016/s0021-9290(00)00036-1.
- [34] M. Fraldi, L. Esposito, G. Perrella, A. Cutolo, and S. C. Cowin, "Topological Optimization in Hip Prosthesis Design," *Biomechanics and modeling in mechanobiology*, vol. 9, no. 4, pp. 389–402, 2010. doi: 10.1007/s10237-009-0183-0.
- [35] T. Iqbal et al., "A General Multi-Objective Topology Optimization Methodology Developed for Customized Design of Pelvic Prostheses," *Medical Engineering & Physics*, vol. 69, pp. 8–16, 2019. doi: 10.1016/j.medengphy.2019.06.008.
- [36] E. Dalpadulo, F. Pini, and F. Leali, "Integrated CAD Platform Approach for Design for Additive Manufacturing of High Performance Automotive Components," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 14, no. 3, pp. 899–909, 2020a. doi: 10.1007/s12008-020-00684-7.
- [37] D. Walton and H. Moztafzadeh, "Design and Development of an Additive Manufactured Component by Topology Optimisation," *Procedia CIRP*, vol. 60, pp. 205–210, 2017. doi: 10.1016/j.procir.2017.03.027.
- [38] O. Vaverka, D. Koutny, and D. Palousek, "Topologically Optimized Axle Carrier for Formula Student Produced by Selective Laser Melting," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 9, pp. 1545–1551, 2019. doi: 10.1108/rpj-07-2018-0171.
- [39] S. N. Reddy et al., "Application of Topology Optimization and Design for Additive Manufacturing Guidelines on an Automotive Component," in *Volume 2A: 42nd Design Automation Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2016b. doi: 10.1115/detc2016-59719.

- [40] H. Bikas, J. Stavridis, P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, "A Design Framework to Replace Conventional Manufacturing Processes with Additive Manufacturing for Structural Components: A Formula Student Case Study," *Procedia CIRP*, vol. 57, pp. 710–715, 2016a. doi: 10.1016/j.procir.2016.11.123.
- [41] A. Großmann, P. Weis, C. Clemen, and C. Mittelstedt, "Optimization and re-Design of a Metallic Riveting Tool for Additive Manufacturing—a Case Study," *Addit Manuf*, vol. 31, 100892, 2020. doi: 10.1016/j.addma.2019.100892.
- [42] E. Tyflopoulos, M. Lien, and M. Steinert, "Optimization of Brake Calipers Using Topology Optimization for Additive Manufacturing," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 4, 1437, 2021. doi: 10.3390/app11041437.
- [43] S. Junk, C. Fleig, and B. Fink, "Improvement of Sustainability Through the Application of Topology Optimization in the Additive Manufacturing of a Brake Mount," in *Sustainable Design and Manufacturing 2017*. Springer International Publishing, pp. 151–161, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-57078-5_15.
- [44] P. Barreiro et al., "New Improvement Opportunities Through Applying Topology Optimization Combined with 3D Printing to the Construction of Gearbox Housings," *Forschung im Ingenieurwesen*, vol. 83, no. 3, pp. 669–681, 2019. doi: 10.1007/s10010-019-00374-1.
- [45] M. Hunar et al., "Comprehensive View on Racing Car Upright Design and Manufacturing," *Symmetry (Basel)*, vol. 12, no. 6, 1020, 2020. doi: 10.3390/sym12061020.
- [46] T. R. Marchesi et al., "Topologically Optimized Diesel Engine Support Manufactured with Additive Manufacturing," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 2333–2338, 2015. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.436.
- [47] S. Mantovani, G. A. Campo, and A. Ferrari, "Additive Manufacturing and Topology Optimization: A Design Strategy for a Steering Column Mounting Bracket Considering Overhang Constraints," *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*, vol. 235, no. 10, pp. 1703–1723, 2020. doi: 10.1177/0954406220917717.
- [48] D. B. Ngim, J.-S. Liu, and R. C. Soar, "Design Optimization for Manufacturability of Axisymmetric Continuum Structures Using Metamorphic Development," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, no. 2, pp. 685–704, 2007. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2006.05.016.
- [49] P. Herbin, D. Grzesiak, and M. A. Krolkowski, "Topology Optimisation Aimed at Additive–SLM Manufacturing of Metal Parts of ExoArm 7-DOF," in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer International Publishing, pp. 533–541, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-68619-6_51.
- [50] S. Huang, X. Deng, and L. K. Lam, "Integrated Design Framework of 3D Printed Planar Stainless Tubular Joint: Modelling, Optimization, Manufacturing, and Experiment," *Thin-Walled Structures*, vol. 169, 108463, 2021. doi: 10.1016/j.tws.2021.108463.
- [51] M. E. Lynch et al., "Design and Topology/Shape Structural Optimisation for Additively Manufactured Cold Sprayed Components," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 8, no. 3, pp. 213–231, 2013. doi: 10.1080/17452759.2013.837629.
- [52] T. Wu, S. A. Jahan, Y. Zhang, J. Zhang, H. Elmounayri, and A. Tovar, "Design Optimization of Plastic Injection Tooling for Additive Manufacturing," *Procedia Manuf*, vol. 10, pp. 923–934, 2017. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.082.
- [53] J. C. Steuben, J. G. Michopoulos, A. P. Iliopoulos, and A. J. Birnbaum, "Functional Performance Tailoring of Additively Manufactured Components via Topology Optimization," in *Volume 1: 37th Computers and Information in Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2017. doi: 10.1115/detc2017-67600.
- [54] J. E. Barnes, "Speed is Relative in AM: A Data-Driven Comparison of Multi-Laser Powder Bed Fusion and Binder Jet Processing," *Additive Manufacturing Magazine*, 2021a. [Online].

<https://www.additivemanufacturing.media/articles/speed-is-relative-in-am-a-data-driven-comparison-of-multi-laser-powder-bed-fusion-and-binder-jet-processing>.

[55] J. E. Barnes, "Making a Slow Decision on a Fast Technology: Evaluating the Business Case for Multi-Laser Powder Bed Fusion," Additive Manufacturing Magazine, 2021b. [Online]. Available: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/making-a-slow-decision-on-a-fast-technology-evaluating-the-business-case-for-multi-laser-powder-bed-fusion>.