

ISSN 1012-2354



ERCIYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ

ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

*Erciyes University
Journal of
the
Institute
of
Science and Technology*

Cilt (Vol.): 40

Sayı (No):1



Genel Yayın Yönetmeni

Prof. Dr. Oktay ÖZKAN, Erciyes Üniversitesi

İmtiyaz Sahibi

Prof. Dr. Fatih ALTUN, Erciyes Üniversitesi

Baş Editör

Prof. Dr. Emel KIZILKAYA AYDOĞAN, Erciyes Üniversitesi

Editör

Prof. Dr. M. Duran TOKSARI, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. M. Gökhan HALICI, Erciyes Üniversitesi

Düzenleme Editörleri

Arş. Gör. Hüseyin ÖZKAYA

Arş. Gör. Mehmet Uğur TÜRKDAMAR

Esra TURAN

Editörler Kurulu

Prof. Dr. Abdulkadir BİLİŞİK, Erciyes Üniversitesi, kbilisik@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Mustafa Serdar ÖNSES, Erciyes Üniversitesi, onses@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Kamil KOÇ, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, kamil.koc@cbu.edu.tr

Prof. Dr. Musa SARI, Gazi Üniversitesi, msari@gazi.edu.tr

Prof. Dr. Orhan BÜYÜKGÜNGÖR, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, orhanb@omu.edu.tr

Prof. Dr. Hasan KÜÇÜKBAY, İnönü Üniversitesi, hasan.kucukbay@inonu.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet AKKURT, Erciyes Üniversitesi, akkurt@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Tuncay CANDAN, The American University of the Middle East, tuncay.candan@aum.edu.kw

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi, karaboga@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. M. Tamer ŞENEL, Erciyes Üniversitesi, senel@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Doğan IŞIK, Erciyes Üniversitesi, dogani@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Burak UZAL, Abdullah Gül Üniversitesi, burak.uzal@agu.edu.tr

Prof. Dr. Niğmet UZAL, Abdullah Gül Üniversitesi, nigmet.uzal@agu.edu.tr

Prof. Dr. Nuray ATEŞ, Erciyes Üniversitesi, nuraya@erciyes.edu.tr
Prof. Dr. Murat GÖKÇEK, Ömer Halisdemir Üniversitesi, mgokcek@ohu.edu.tr
Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU, Erciyes Üniversitesi, saracog@erciyes.edu.tr
Prof. Dr. Semih YILMAZ, Erciyes Üniversitesi, semihyilmaz@erciyes.edu.tr
Doç. Dr. Ömer AYDIN, Erciyes Üniversitesi, omeraydin@erciyes.edu.tr
Doç. Dr. Emrah TIRAŞ, Erciyes Üniversitesi, emrahtiras@erciyes.edu.tr
Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŐKAN, Erciyes Üniversitesi, ucaliskan@erciyes.edu.tr
Dr. Öğr. Üyesi Erhan KARAKAYA, Yozgat Bozok Üniversitesi, erhan.karakaya@bozok.edu.tr



ERCIYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology

ISSN: 1012-2354



Yayın Danışma Kurulu

Prof. Dr. Fatih ALTUN, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Ülkü YETİŞ, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Filiz B. DİLEK, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gülçin BÜYÜKÖZKAN, Galatasaray Üniversitesi

Prof. Dr. Ceyda OĞUZ, Koç Üniversitesi

Prof. Dr. Yaman BARLAS, Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Levent KANDİLLER, Yaşar Üniversitesi

Prof. Dr. Cengiz KAHRAMAN, İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Cevriye Temel GENCER, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet TANYAŞ, Maltepe Üniversitesi

Prof. Dr. Tuncay CANDAN, Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof.

Dr. Li TONGXING, Linyi University

Prof. Dr. Panos M. PARDALOS, University of Florida

Prof. Dr. José Machado Minho, University

Prof. Dr. Petraq PAPAJOĞJË, University of New York Tirana

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Orhan BÜYÜKGÜNGÖR, Ondokuz Mayıs Üniversitesi



ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology

ISSN: 1012-2354



Cilt 40, Sayı 1, Hakem Kurulu

Prof. Dr. Cemal YILMAZ, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Celal Öztürk, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Fatih IŞIK, Hitit Üniversitesi

Prof. Dr. Metin Zontul, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Prof. Dr. Okan KARAHAN, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Süleyman TOY, Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Tuncay AYDOĞAN, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Prof. Dr. Uğur Yavuz, Atatürk Üniversitesi

Doç. Dr. Canan CİMŞİT, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Fırat ŞAL, İskenderun Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hüseyin Samet AŞIKKUTLU, Burdur Mehmet Akif Ersoy
Üniversitesi

Doç. Dr. İkram ORAK, Bingöl Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Akif GÜNEN, Gümüşhane Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa KAYA, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa KILIÇ, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji
Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa YAĞCI, Ahi Evran Üniversitesi

Doç. Dr. Orhan KEKLİKÇİOĞLU, Erciyes Üniversitesi

Doç. Dr. Selman AYDIN, Batman Üniversitesi

Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Abdulkadir AYANOĞLU, Mardin Artuklu Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Emin KARKINLI, Niğde Ömer Halisdemir
Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Çağlar SEVİM, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Emel ÇAKMAK, Aksaray Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ertan KÖSEDAĞ, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Harun AKBULUT, Yozgat Bozok Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mahmut UYAR, Siirt Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Melih YILDIZ, Erciyes Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Nimet YILDIRIM TİRGİL, Ankara Yıldırım Beyazıt
Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Özgül KARATAŞ, Konya Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Tuba ÇAĞLIKANTAR, Gazi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Tuba ÇAKICI, Atatürk Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Yakup TÜREDİ, İskenderun Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Kübra UYAR, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Özgür YILDIZ, Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Şeyda ERDOĞAN, Yozgat Bozok Üniversitesi

Arş. Gör. Ali Emre GÖK, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi

Arş. Gör. Başak ÖZTÜRK, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi

Arş. Gör. Muhsin ALÇI, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Arş. Gör. Mustafa YURDAKUL, Kırıkkale Üniversitesi

Cilt: 40 Sayı: 1

Nisan 2024

İçindekiler

Sayfalar	Makaleler	Türü
1-9	New Aptamer Pairs as a Candidate for the Rapid Detection of Food Pathogen, Salmonella enteritidis	Araştırma Makalesi
10-19	Beton Basınç Dayanımı Tahmini için Özellik Mühendisliği ve Makine Öğrenimi Tabanlı Hibrit Bir Yaklaşım	Araştırma Makalesi
20-33	2015-2021 Yılları Arasında Muğla İlinde LTO Döngüsü Esnasında B737-800 ve A320 Tip Uçaklardan Kaynaklanan Emisyonun Gerçek Zamanlı Hesaplanması	Araştırma Makalesi
34-44	Fuzzy Logic Based Low Cost Mobile Alert System for Asthma and COPD Patients	Araştırma Makalesi
45-55	Mechanical Properties and Deformation Behavior of Al/Al-SiC Double-Walled Composite Pipes Under Radial Loading	Araştırma Makalesi
56-67	Düz bir Yüze Sürekli ve Eşzamanlı Olarak Çarpan Halkasal ve Dairesel Jetin Isı Transfer Karakteristiklerinin Sayısal Analizi	Araştırma Makalesi
68-74	Efficiency Improvement of Organic Photovoltaic Solar Cells via Spin Radical Doping	Araştırma Makalesi
75-91	Dizel Motorda Yakıt Katkı Maddesi Olarak Nanopartiküllerin Kullanımının Araştırılması	Araştırma Makalesi
92-107	An Innovative Approach to Improve Point Location Detection System with ANFIS using RSSI Signals and Fingerprinting Method	Araştırma Makalesi
108-122	Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü Değişim Analizi ve Geleceğe Yönelik Simülasyon Modeli, Kayseri Melikgazi Örneği	Araştırma Makalesi
123-135	Detection of Retinal Diseases from Fundus Images Using Deep Learning and Adaptive Histogram Equality	Araştırma Makalesi
136-147	Research Rainwater Harvesting Potential of Erciyes University Campus Based on The UI GreenMetric Ranking	Araştırma Makalesi
148-166	SPT Based Liquefaction Hazard Assessments in Iğdır City (Türkiye)	Araştırma Makalesi

New Aptamer Pairs as a Candidate for the Rapid Detection of Food Pathogen, *Salmonella enteritidis*

Dilek ÇAM DERİN¹ 

*1 İnönü University Faculty of Arts and Sciences Department of Molecular Biology and Genetics, MALATYA

(Alınış / Received: 02.02.2024, Kabul / Accepted: 14.03.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

Keywords

S. enteritidis,
Aptamer pairs,
Lateral flow assay,
Food pathogen

Abstract: Food pathogens are crucial for human and animal health. *S. enteritidis*, enteric bacteria, is one of the most popular pathogen and causes salmonellosis. Vomiting, diarrhea, fever and abdominal cramps are typical symptoms occurring at 12-72 hour after the infection and can cause death. Food based infections in the USA and EU are primarily caused by *S. enteritidis*. Thus, early and rapid detection of bacteria is always highly significant. In this sense, lateral flow assays (LFAs) are notably advantageous with regards to the obtaining rapid results and practical use. LFAs are commonly prepared by antibodies and aptamers. Aptamers are single stranded DNA and RNA molecules and bind to the target molecules, selectively. Gold nanoparticles (AuNPs) are the most common labels used for LFAs. In this work, it is aimed to develop the aptamer paired strip assay (APSA) platform by using aptamer pairs specific to *S. enteritidis*. It was observed that 1st aptamer pairs are suitable for developing the LFAs for the recognition of *S. enteritidis* compared to the other pairs and M180 membrane was found as suitable membrane in terms of the flow rate and positive results.

Gıda Patojeni *Salmonella enteritidis*'in Hızlı Teşhisi için Aday Yeni Aptamer Çiftleri

Anahtar Kelimeler

S. enteritidis,
Aptamer pairs,
Lateral flow assay,
Food pathogen

Öz: Gıda patojenleri insan ve hayvan sağlığı için çok önemlidir. Enterik bir bakteri olan *S. enteritidis* en önemli patojenlerden biridir ve salmonellosise sebep olur. Kusma, ishal, ateş ve abdominal kramplar enfeksiyondan 12-72 saat sonra oluşan tipik semptomlardır ve ölüme sebep olabilir. ABD ve Avrupa'da gıda bazlı enfeksiyonlar öncelikle *S. enteritidis*'ten kaynaklanır. Bu nedenle bakterinin erken ve hızlı teşhisi her zaman oldukça önemlidir. Bu anlamda yanak akışlı testler (LFAs) hızlı sonuçlar alma ve pratik kullanım açısından oldukça avantajlıdır. LFA'ler yaygın olarak antikor ve aptamerler ile hazırlanır. Aptamerler tek zincirli DNA ve RNA molekülleridir ve hedef moleküle seçici şekilde bağlanır. Altın nanoparçacıklar (AuNPs) LFA'lerde en yaygın kullanılan işaretleyicilerdir. Bu çalışmada *S. enteritidis*'e özgün aptamer çiftleri kullanılarak aptamer çiftli strip test (APSA) platformu geliştirilmesi amaçlanmıştır. 1. aptamer çiftinin diğer çiftlerle karşılaştırıldığında *S. enteritidis* teşhisi için LFA geliştirilmesinde uygun olduğu gözlemlenmiştir ve M180 membran akış oranı ve pozitif sonuçlar açısından uygun membran olarak bulunmuştur.

*İlgili Yazar, email: dilek.cam@inonu.edu.tr

1. Introduction

Salmonella spp. having about 2300 serotypes is one of the most important bacteria which causes to enteric diseases for human and animals. Gastroenteritis, enteric fever and sepsis are common disorders caused by

Salmonella. Most of the infections resulted by *Salmonella* are arised by food and transmission to human is generally occurred with meat, chicken, egg, poultry and pig. So, it can cause to salmonellosis via invading the digestive system of host with contaminated nutrition and might be resulted with death. Besides, *Salmonella* infections may be resulted with economic loss at food industry, critically [1]. Almost half of the infections of digestive system seen in the USA in every year are caused by contaminated food by *Salmonella*. According to the annual report for zoonoses of European Food Safety Authority (EFSA) and the European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC), nearly one in three foodborne outbreaks in the EU in 2018 were caused by *Salmonella* and Salmonellosis was the second most commonly reported gastrointestinal infection in humans in the EU (91 857 cases reported) after campylobacteriosis (246 571). Among the 5146 food and waterborne outbreaks, *Salmonella* was the most commonly detected agent and *S. enteritidis* caused one in five outbreaks [2] which is similar with the report in 2016 [3]. Additionally, 15 EU/EEA countries reported 656 confirmed cases and 202 probable cases for *S. enteritidis* from 2017 to 2020 [4]. Thus, since *S. enteritidis* is one of the most common species causing to food poisoning, its rapid detection is crucial. However, conventional methods including culturing in selective medium, serological and biochemical assays take 4 days and need trained personnel [5]. The delay in detection may also increase the infection risk. Although polymerase chain reaction (PCR) [6], immunomagnetic [7] and biosensor [8] based detections were reported, the need of more reliable extraction methods, further experimental steps and advanced devices, and sample loss are some limitations. Thus, rapid and sensitive detection is always become attractive. In that case, LFAs which are immunochromatographic assays composed of four membranes and ready to use point of care assays have some advantages compared to the those methods. They are simple diagnostic dipstick assays developed by various reagents including antibodies, aptamers and nanoparticles [9][10] as a commercial since 1980. Long shelf life, practical and easy to usage, specificity and high sensitivity, integration with electronical and reading systems, rapid manufacturing and market presence are some advantages of LFAs. AuNPs are most widely used labels for LFAs. Because it allows to naked eye analysis and easy surface modification for immuno-analysis and biosensor applications [11][12].

Aptamers are single chain DNA or RNA molecules binding to their targets with high affinity such as proteins as a defined architectures and having long shelf life [13][14]. They are discovered by systematic evolution of ligands by exponential enrichment (SELEX) and alternately partitioned for target binding. Since they are oligonucleotides aptamers can be assembled into supramolecular multi-component structures using hybridization. The adaptation of aptamers to biosensor and novel diagnostic systems become popular in 2000s. Although the usage of aptamers in LFAs is increasing in recent years [15], researches are still limited because of the technical and application procedures. Using aptamers in LFA is generally based on aptamer pairs while various reagents can be used along with the aptamers, and the aptamer based LFAs have some advantages compared to the antibody based LFAs. Because two antibodies may not be paired succesfully [16], labelling with antibodies needs to sensitive pH and salt conditions, and has storage problems restricting the process. Since the endurance of antibody is a crucial problem [17] alternative recognition pairs should be replaced for sandwich assays. Thus, a few aptamer based LFAs developed for the recognition of *S. enteritidis* were reported in the literature. However, capture aptamers used for the assays are different from each other, further experimental steps such as isothermal strand displacement amplification or advanced instruments are needed for the analysis and affinity of aptamers to the target may be low [18][19][20]. Therefore, new aptamer pairs as a candidate for the rapid and sensitive detection of *S. enteritidis* are needed for developing point of care tests and various detection systems.

In this work, two aptamers specific to *S. enteritidis* which were recently reported in the literature with high affinity were used for developing the LFAs by preparing 4 aptamer pairs in order to see the potential usage of these aptamers for point of care tests..

2. Material and Method

2.1. Chemicals

HAuCl₄ •xH₂O (Fluka), nitrocellulose membranes (M240, M180, M120), sample pad and absorbant pad, glass fiber conjugate pad (Millipore), Tryptic Soy Broth (Sigma) and streptavidin (Sigma) were used. Sodium tricitrate was from Applichem. Two aptamers, Crn-2 and Crn-1, specific to *S. enteritidis* [13] were used as thiol or biotin modified and the primer regions were labelled as bold. Thiol modified aptamers which are Crn-2 SHA: 5'Thio/**AAGGGCTGGCTGGGATGGA** TGT AAG AAG GGA GGA AAG GAC CTA AGA CCT GCT ATA TTG CGA **TCACTCCACGGACCCCACT**-3'and Crn-1 SH: 5' Thio/**AAGGGCTGGCTGGGATGGA** CCC TCC CGA AAC GAG CTG TCT CTT AAC GGA AGC TAA TCT GCC **TCACTCCACGGACCCCACT**-3' were called as capture aptamers. Biotin modified aptamers which are Crn-1-Bio: 5' Bio-**AAGGGCTGGCTGGGATGGA** CCC TCC CGA AAC GAG CTG TCT CTT AAC GGA AGC TAA TCT **GCCTCACTCCACGGACCCCACT**-3' and Crn-2 Bio: 5' Bio **AAG GGC TGG CTG GGA TGG A** TGT AAG AAG GGA GGA AAG GAC CTA AGA CCT GCT ATA TTG CGA **TCA CTC CAC GGA CCC CAC T**-3' were called as detector aptamers, and biotin modified sequences complementary to two capture aptamers were purchased from

Integrated DNA Technologies. *S. enteritidis* and *E. coli* were from NanoBiz R&D (Turkey). Nanodrop 2000 UV-Vis spectrophotometer (Thermo Scientific; Waltham, MA, USA) and multiscan plate reader (Biotek-Epoch/2 microplate reader) were used for obtaining the spectra from AuNPs and conjugates. Malvern Zeta Potential instrument was used for getting the size and zeta potential of both the naked and conjugated AuNPs.

2.2. Methods

2.1. Gold nanoparticle synthesis

AuNPs were synthesized according to the sodium citrate reduction and concentrated. Briefly, 0.01% HAuCl₄.xH₂O was boiled in sterile conical flask and 1% sodium citrate was added into the solution [21]. After changing the color of solution from black to reddish in a 2 min, it was allowed to further boiling for about 10 min to complete the reduction before filter sterilization. UV-Vis spectra was measured for determining the max absorbance of surface plasmons (λ_{max}) of AuNPs. In order to make a concentrated AuNPs, colloidal gold solution was centrifuged for 30 minutes. Then, 5 times concentrated AuNPs, 5X AuNPs, were stored at 4°C for further use.

2.2. Gold nanoparticles and capture aptamer conjugations

After preparation of the stock solutions of two aptamers (Crn-2 and Crn-1), 0.2 μM, 2 μM and 4 μM of the capture probes were used for the conjugation and compared for the assay efficiency. To activate the disulphide bonds, aptamers were treated with Tris(2-carboxyethyl)phosphine hydrochloride (TCEP) at room temperature, firstly. Then, this solution was added into 1 ml of AuNPs solution and incubated at room temperature for the conjugation. Ultrapure water was used as a negative control. After the incubation, phosphate buffer saline (PBS) was added into the solution for the stability of AuNPs and incubated for overnight. Then, solution was centrifuged at 12000 rpm and pellet was resuspended in 20 mM sodium phosphate buffer containing BSA, %0,25 Tween 20 and sucrose. Then, solution was re-centrifuged and washed with the same buffer as twice and prepared conjugate was stored at 4°C after resuspending in the same buffer. To develop the sandwich assay two conjugates, conjugate 1 and conjugate 2, and four aptamer pairs using these conjugates were prepared, separately and shown in Table 1.

Table 1. AuNPs-Aptamer conjugates and aptamer pairs used for the sandwich assay on LFAs

Conjugate 1 (Crn-2 SHA/AuNPs)	Crn-2 SHA: 5'Thio/ AAGGGCTGGCTGGGATGGATGT AAG AAG GGA GGA AAG GAC CTA AGA CCT GCT ATA TTG CGA TCCTCCACGGACCCACT-3'
Conjugate 2 (Crn-1SH/AuNPs)	Crn-1SH: 5'Thio/ AAGGGCTGG CTGGGATGGACCC TCC CGA AAC GAG CTG TCT CTT AAC GGA AGC TAA TCT GCC TCCTCCACGGACCCACT-3'
1 st aptamer pairs	Conjugate 1/Crn-1 Bio
2 nd aptamer pairs	Conjugate 2/Crn-2 Bio
3 rd aptamer pairs	Conjugate 1/Crn-2 Bio
4 th aptamer pairs	Conjugate 2/Crn-1 Bio

2.3. Preparation of the target bacteria

The concentration of *S. enteritidis* was determined by plate counting method as 10¹⁰ cfu/ml. Then bacteria was cultured in Tryptic Soy Broth (TSB) and grown at 37°C for 16 hour at 150 rpm. They were collected at early stationary phase and centrifuged at 5000 rpm for 5 minutes. After washing with PBS, they were suspended in running buffer (RB) and used for loading to the strips. Four different RBs were experienced in this work and called as RB 14, RB 1, RB 13 and RB. RB 14 is 20 mM Tris, 50 mM NaCl, 5 mM KCl, 5 mM MgCl₂, 2 mM CaCl₂, 0.1 mM BSA, 1.7% Triton X100 [22]; RB 1 is 10X SSC/1% BSA; RB 13 is 10 mM Tris, 120 mM NaCl, 20 mM CaCl₂, 5 mM KCl, 0.1% Tween 20, 1% PEG 6000, 2% sucrose, 5% methanol [23] and RB (Binding buffer) is PBS containing 4.5g/L glucose, 5mM MgCl₂, 1 mg/ml BSA [13].

2.4. Preparation of the lateral flow assay

The width of the strip tests was adjusted to 0.4 cm and the strip components were manually placed as specified earlier [24]. All the solutions for membrane moisturizing were filter sterilized before usage. Three types of solutions were separately prepared for sample pad soaking to make a comparison. They are 1) 0.05M Tris-HCl, 0.25% TritonX100, 0.15M NaCl [25], 2) 0.5% TritonX 100, 1% BSA, 2% sucrose, 50mM boric acid [18] and 3) 0.01M PBS, 3% BSA, 0.05% Tween 20 [26]. Sample pad was dried at 37°C and placed on the strip. To prepare a conjugate pad two principles were experienced. First is that the target bacteria and conjugates were incubated at 37°C and 4°C before soaking the conjugate pad. Then, they were dried. Second is that the conjugate pad was prepared by soaking the conjugate without target and dried before applying the target. The biotinylated oligonucleotides on the test and control lines were immobilized, manually using micropipette. Detector aptamers were used as test lines while biotin modified complementary oligonucleotides against to the aptamers on the surface of AuNPs as

control lines. For this purpose, streptavidin was added into the bio-modified oligonucleotides, separately and then centrifuged at 14000 rpm. Remained solution was suspended in PBS and stored at -20°C for the preparation of strip assays. The strips were prepared as duplicate and washed with either PBS or saline-sodium citrate buffer if needed and then results were analyzed with naked eye. The assay principle of the prepared LFAs was illustrated in Figure 1.

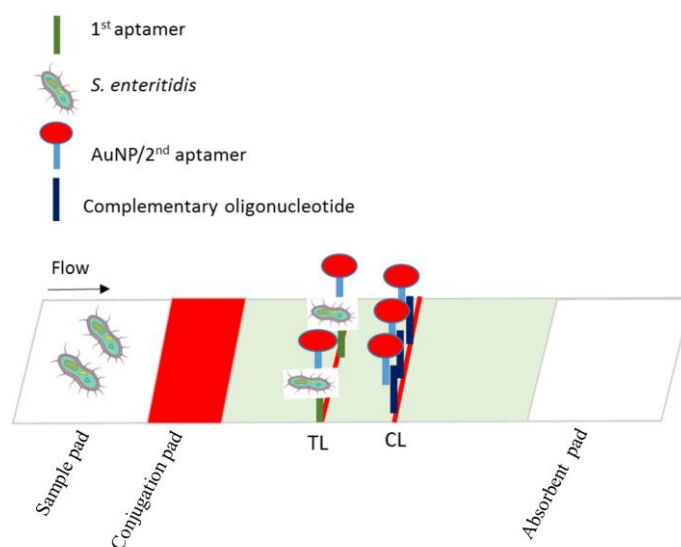


Figure 1. The working principle of the aptamer pairs based LFAs

3. Results

3.1. Synthesis and conjugation of gold nanoparticles

Figure 2 shows the AuNPs and conjugations. For the conjugation, 2 μ M and 4 μ M aptamer concentrations were found as sufficient for coating the AuNPs while 0.2 μ M aptamer was not enough for preventing the nanoparticles from aggregation (data not shown). To highlight, gold conjugate showed high stability when added with the target, *S. enteritidis*, while it was flocculated with *E. coli*, which means that aptamers covalently bound to AuNPs captured the target and continued the stability of conjugate (data not shown). Red color intensity of the conjugates also verified the aptamer binding to AuNPs since the negative control without aptamer showed aggregation. Maximum absorbance value of the surface plasmons (λ_{max}) of AuNPs was measured by NanoDrop 2000c Spectrophotometer (data not shown) and EPOCH2 Plate Reader/Spectrophotometer. Results were in consistent and λ_{max} was measured as 520 \pm 2nm for the naked AuNPs (Figure 2A, 1-2). The peak shift was observed as 526-530 nm for both conjugates (conjugate 1 and 2) as expected since the accumulation of aptamers on to AuNPs (Figure 2, 3-4).

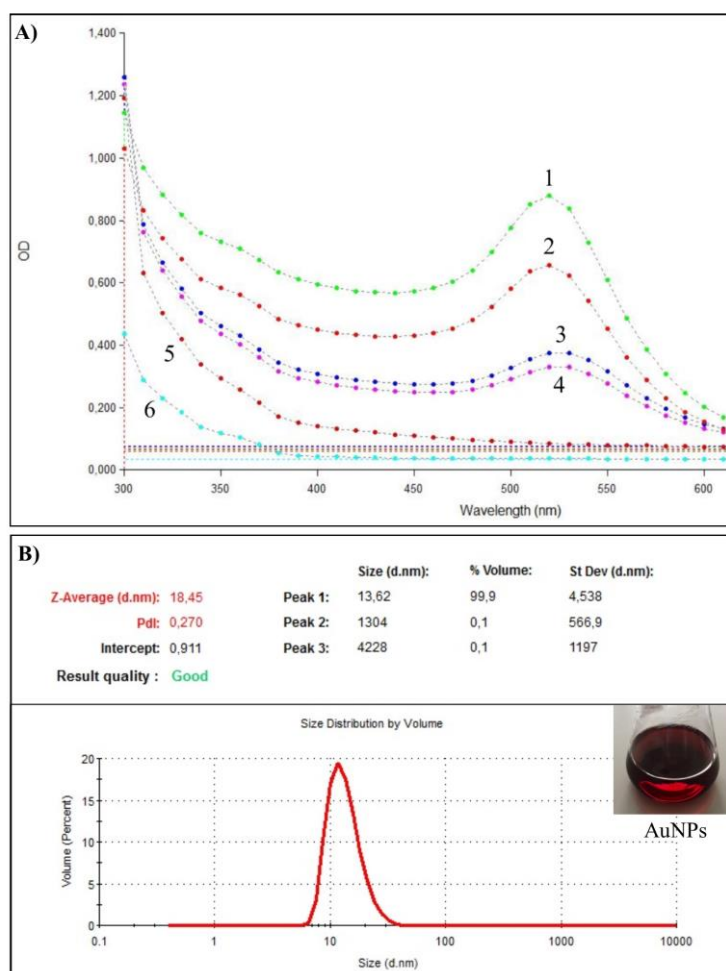


Figure 2. UV-Vis Spectroscopy and the size measurement of AuNPs. A) λ_{\max} of naked (1-2) and conjugated AuNPs (3-4) Conjugate 2 and 1, respectively. 5: λ_{\max} measurement of resuspension buffer. 6: λ_{\max} measurement of dH₂O. Bottom flat: AuNPs/aptamer solution without TCEP. The inset shows the color intensity and stability of naked nanoparticles

The size of the synthesized AuNPs were found as 18 nm (Figure 2B) and the Zeta Potential was -42 ± 1 . (data not shown) while they were 35 ± 1 nm and -11 ± 2 for the conjugation (data not shown). After the accumulation of aptamers on AuNPs, both the size increment was observed and surface charge was shifted to less negative as expected. Because the reagents such as BSA or aptamers in suspension buffer not only cause to increasing of particle size but also change the surface charge.

3.2. Preparation of the strip tests

Two conjugations and four aptamer pairs were prepared and experienced for sandwich assay. Among the three buffer for sample pad soaking, buffer 3 was used for further experiments as it allowed to efficient flow and decreased the non specific binding. Among the four RBs, RB 1 and RB 14 did not show the non specific binding on test lines which were designed by 1st and 4th aptamer pairs (data not shown) and they were preferred for further experiments because of having a good assay performance. Control lines of all strips were visible, clearly which is meaning that tests are working and valid. Strip assays were also designed without conjugate pad, but both the conjugate and target were retarded on the pad and flow was not observed (data not shown). It is clearly evidence that conjugate pad is crucial for effective interaction between the gold conjugate and target, and also efficient flow through the membranes. Therefore, all the strip tests were prepared with conjugate pad for further experiments and results demonstrated that aptamer pairs could be usable in these conditions by applying the target bacteria.

3.3. Application of *S. enteritidis* to the prepared strip tests

The assay performance of the membranes having different flow time was compared with the aptamer pairs by applying the *S. enteritidis*. Figure 3 demonstrates the different membranes and buffer relations with two ways of target application into the assay. 1st way is to load the target into sample pad, directly (Figure 3A). 2nd way is to load the mixture of target and conjugate to the conjugate pad after incubating for 15 minutes (Figure 3B). According to the findings, M180 showed positive results with 1st pair using both RBs as the detection of *S. enteritidis* was occurred in the test lines, clearly (Figure 3, A1-A4) even if only one strip had weak test line intensity

(A2). Although the *S. enteritidis* was captured on test lines with all the aptamer pairs, a few of them did not show the control line (Figure 3B, strip 2,4,7,8,9,11) using M120 membrane. Thus, it was decided that the best recognition of *S. enteritidis* was achieved by 1st aptamer pairs on M120 membrane (Figure 3B, strip 3,5,6) as it was similar with M180 membrane. However, the control lines of the strip 3 had weak line intensity. Generally, the weak line intensity on the control lines can be caused by the insufficient flow of conjugate and resulted with the weak interaction between the conjugate and complementary oligonucleotide. This could be understood from the Figure 3A, strip 1-4 and 5-6 because of the efficient flow on M180 membrane using the same aptamer pairs. Although the 4th aptamer pairs showed positive detection in M120 membrane, similarly the line intensity of control line was weak (Figure 3B, strip 10), but there was no detection on M180 membrane (Figure 3A, strip 5,6). This finding demonstrated the significance of the membrane and its suitability for used aptamer pairs. M240 membrane having a slow flow rate did not show the positive detection in these conditions mentioned above (data not shown). To highlight that the amount of conjugate has also significant role on line intensities. For instance, diluted conjugate may have weak color intensity compared to the non-diluted conjugate. This is reasonable because diluted conjugate means that aptamer concentration is low compared to the non-diluted one. Thus, the number of captured target is low and accumulation of the conjugate after the recognition on test zones become weak. However, non-diluted conjugate may also retard the flow (Figure 3B). As a result, 1st aptamer pairs were seen suitable for development of the strip assay compared to the other pairs and M180 was decided as the best membrane for further studies.

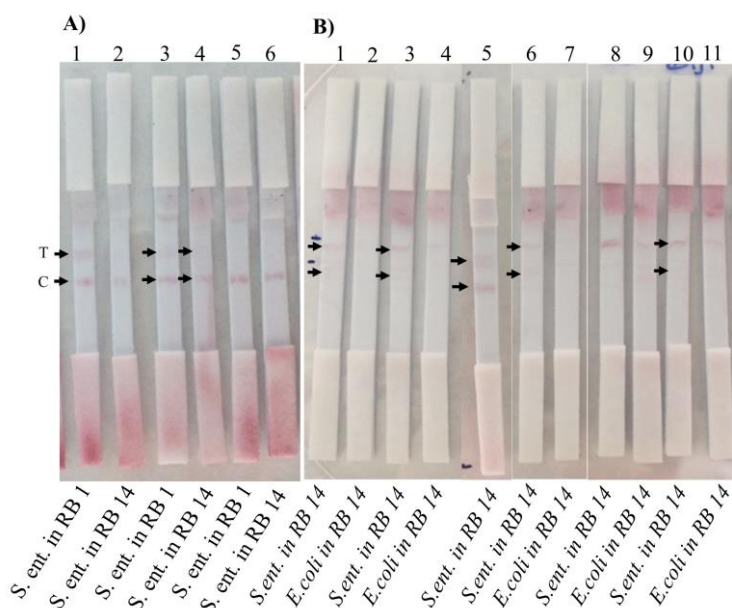


Figure 3. Application of *S. enteritidis* in different RBs to the LFAs prepared by M180 membrane (A) and M120 membrane (B) using 2 μ M conjugates. A) Strip 1-4: 1st pair, Strip 5-6: 4th pair. B) Strip 1-2: 3rd pair, Strip 3-7: 1st pair, Strip 8-9: 2nd pair, Strip 10-11: 4th pair. T: Test line C: Control line

In order to determine the optimal binding temperatures of aptamer pairs in the prepared assay, M180 membrane, buffer 3 as a sample pad buffer and RB 14 were also experienced here using the 4 μ M conjugate. According to the results, 1st aptamer pairs showed the positive detection without non specific binding with the negative controls after the incubation of target bacteria and conjugate at 37°C for 15 minutes (Figure 4, A1-A3). Although 2nd aptamer pairs recognized the target bacteria, non specific binding with the negative controls was observed (Figure 4, A6-A8). Interestingly, 3rd aptamer pairs could not detect the target bacteria and showed nonspecific binding with *E. coli*, weakly (Figure 4, A4-A5). This might be explained that the binding of the aptamer might be changeable and it can cause non specific interactions when the same aptamer is used as both the capture and detector aptamer in the sandwich assay. Besides, when the aptamer presenting on AuNPs binds to the target it could not be captured on the test line by the same aptamer as the binding site was already occupied. The similar result was also observed with 4th aptamer pairs since the same aptamer was used as detection and capture agent (Figure 4, A9-A10). Therefore, it might be inferred from that these aptamers should be used as a separate pairs for developing the point of care tests. Figure 4B also shows the results performed at 4°C and 37°C for 1 hour incubation of the target and conjugate. Results demonstrated that temperature is crucial for effective binding of these aptamer pairs to *S. enteritidis*. For instance, the recognition of *S. enteritidis* by the 1st aptamer pairs was better at 37°C (Figure 4B, B4-B6) than 4°C (Figure 4, B1-B3) in terms of the test line intensity. This was also verified and repeated by the previous results which were shown in Figure 4A, A1-A3 performed at 37°C. Therefore, it can also be said that there is no significant difference between the 1 hour and 15 minutes incubation of the target and conjugate for the interaction between the aptamer and target bacteria. Interestingly, non specific interaction was occurred with the 1st aptamer

pairs by increasing the incubation time (data not shown). 2nd aptamer pairs showed non specific interaction with the negative controls (Figure 4A, A6-A8) at 37°C. Although this problem was solved by changing the incubation time, the target was not detected this time (Figure 4B, B7-B12). This may be related with the time dependent binding potential of the aptamers and it needs further optimizations. Additionally, it also verified that the aptamer position on the sandwich assay has also critical role for effective recognition because the detection by the 1st aptamer pairs was successful compared to the 2nd aptamer pairs. To make a summary, 1st aptamer pairs seemed to have potential for developing LFAs at 37°C with different incubation times (Figure 4, A1-A3; B4-B6). It was also seen that 2nd aptamer pairs have potential for preparing the LFAs after the incubation at 4°C as the non specific interactions were not observed (Figure 4B, B7-B9). However, further optimizations for binding to target were needed. This might be possible with designing the new aptamer probes and capture sequences for the hybridization on sandwich assays.

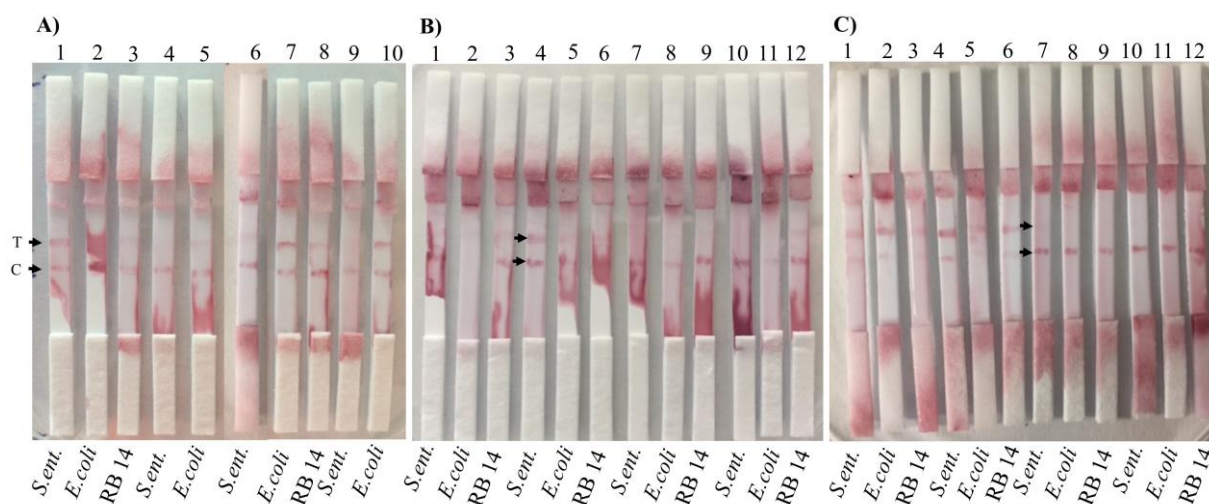


Figure 4. LFAs developed for deciding the optimum temperature of aptamer pairs for the recognition of *S. enteritidis* using 4 μ M conjugates. A) Strip 1-3: 1st pair, Strip 4-5: 3rd pair, Strip 6-8: 2nd pair, Strip 9-10: 4th pair. *S. enteritidis* and conjugate were incubated at 37°C for 15 minutes. B) Strip 1-6: 1st pair, Strip 7-12: 2nd pair. *S. enteritidis* and conjugate were incubated at 4°C (strip 1-3; strip 7-9) and 37°C (strip 4-6; strip 10-12) for 1 hour

4. Discussion and Conclusion

Four aptamer pairs specific to *S. enteritidis* were applied to the prepared LFAs. To the best of our knowledge, this is the first study showing the applicability of these two aptamers to the strip assay by using as different aptamer pairs. Therefore, the assay optimizations including running buffer, membrane types having different flow rate, incubation time and temperatures and aptamer concentrations were experienced. Results showed the rapid detection of *S. enteritidis* without any further experimental steps such as magnetic separation (27), PCR (28) or preparing electrochemical biosensors based on aptamers (29). M180 membrane was found to be suitable in this study. Although 1st and 2nd aptamer pairs were found as suitable for developing the LFAs, 1st aptamer pairs were better than others in these conditions and 2nd aptamer pairs needs to further optimizations for efficient detection. Aptamer pair based LFAs also showed some critical issues for developing the strip assay for the usage of *S. enteritidis* detection. First is the design of aptamer pairs. If the pairs used for the recognition and capture are used separately, target recognition is better than the usage of the same aptamer as a recognition and capture agent. This is reasonable because different aptamers bind to the different surface of target resulted by efficient detection. However, aptamer presents on the test line may not capture the target, efficiently since the surface of target is already occupied by itself when the same aptamer is present on the AuNPs. This was observed by using 3rd and 4th aptamer pairs in this study. Second is the aptamer and conjugate concentrations. If the aptamer is not enough for coating the AuNPs it causes agglomeration and capture lines can not be visible with the low amount of conjugate. Third is the assays buffers. The aptamer binding is affected by the temperature and buffers. To obtain the positive results, temperature and buffers specific to aptamers should be optimized and used for the efficient binding. Fourth might be an aptamer length. Although aptamers having primer sequences were used here, the form of aptamers without primer regions were not experienced. Thus, since the primer regions may cause hairpin and affect the binding of aptamers to the target the non specific interactions might be occurred here and this will be considered as a further study. As a summary, two candidate aptamers for developing the LFAs were examined here, and it was concluded that these aptamers could be used as pairs and adopted to the strip assay for the rapid detection of *S. enteritidis*.

Acknowledgment

This work was supported by the Scientific Research Project at Çankırı Karatekin University (BAP- FF150219B05). The author acknowledges to Nanobiz NanoBiotechnological Systems R&D Limited, Dr. Ceren Bayrac (Karamanoğlu Mehmet Bey University, Department of Biomedical Engineering) and Dr. Mine TÜRKTAŞ ERKEN (Gazi University, Department of Biology) for their kindly help.

References

- [1] Levy, B. S., McIntire, W. 1974. The economic impact of a food-borne salmonellosis outbreak. *JAMA*, 230:1281-1282.
- [2] EFSA and ECDC. 2018. The European Union One Health 2018 Zoonoses Report. *EFSA Journal* 2019;17(12):5926.
- [3] ECDC. 2016. Salmonellosis- Annual Epidemiological Report 2016 (2014 data). Annual Epidemiological Report on Communicable Diseases in Europe. <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/salmonellosis-annual-epidemiological-report-2016-2014-data> (Date accessed: 31.01.2024).
- [4] ECDC-EFSA. 2020. RAPID OUTBREAK ASSESSMENT, Multi-country outbreak of *Salmonella* Enteritidis infections linked to eggs, Third update. <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/multi-country-outbreak-salmonella-enteritidis-infections-linked-eggs> (Date accessed: 31.01.2024).
- [5] MinLee, K., Runyon, M., Herrman, T. J., Phillips, R., Hsieh, J. 2015. Review of *Salmonella* detection and identification methods: Aspects of rapid emergency response and food safety. *Food Control*, 47: 264-276.
- [6] Pathmanathan, S. G., Cardona-Castro, N., Sánchez-Jiménez, M. M., Correa-Ochoa, M. M., Puthuchery, S.D., Thong, K. L. 2003. Simple and rapid detection of *Salmonella* strains by direct PCR amplification of the *hlyA* gene. *Journal of Medical Microbiology*, 52 (9): 773-776.
- [7] Wen, C. Y., Hu, J., Zhang, Z. L., Tian, Z. Q., Ou, G.P., Liao, Y. L., & Pang, D. W. 2013. One-step sensitive detection of *Salmonella typhimurium* by coupling magnetic capture and fluorescence identification with functional nanospheres. *Analytical chemistry*, 85(2): 1223-1230.
- [8] Zhang, D., and Alocilja, E. C. 2008. Characterization of nanoporous silicon-based DNA biosensor for the detection of *Salmonella* Enteritidis. *Sensors Journal, IEEE*, 8(6): 775-780.
- [9] Laderman, E. I., Whitworth, E., Dumaul, E., Jones, M., Hudak, A., Hogrefe, W., & Groen, J. 2008. Rapid, sensitive, and specific lateral-flow immunochromatographic point-of-care device for detection of herpes simplex virus type 2-specific immunoglobulin G antibodies in serum and whole blood. *Clinical and Vaccine Immunology*, 15(1): 159-163.
- [10] He, Y., Zhang, S., Zhang, X., Baloda, M., Gurung, A. S., Xu, H., & Liu, G. 2011. Ultrasensitive nucleic acid biosensor based on enzyme-gold nanoparticle dual label and lateral flow strip biosensor. *Biosensors and Bioelectronics*, 26(5): 2018-2024.
- [11] Deng, Y. P., Zhao, H. Q., Jiang, L. 2000. Applications of nanogold particles in biomimetic engineering. *China Basic Science*, 9: 11-17.
- [12] Siciliano, G., Alsadig, A., Chiriaco, M. S., Turco, A., Foscari, A., Ferrara, F., Gigli, G., Primiceri, E. 2024. Beyond traditional biosensors: Recent advances in gold nanoparticles modified electrodes for biosensing applications. *Talanta*, 268: 125280.
- [13] Bayrac, C., Eyidoğan, F., Öktem, H. A. 2017. DNA aptamer-based colorimetric detection platform for *Salmonella* Enteritidis. *Biosensors and Bioelectronics*, 98; 22-28.
- [14] Ellington, A. D., Szostak, J. W. 1990. In vitro selection of RNA molecules that bind specific ligands. *Nature*, 346(6287):818-22.
- [15] Çam Derin, D., Gültekin, E., Gündüz, Elif., Otlu, B. 2024. Comparison of 6 aptamer-aptamer pairs on rapid detection of SARS-CoV-2 by lateral flow assay. *Journal of AOAC International*, DOI: 10.1093/jaoacint/qsae004 (in press).
- [16] Zeng, H., Guo, W., Liang, B., Li, J., Zhai, X., Song, C., Zhao, W., Fan, E., Liu, Q. 2016. Self-paired monoclonal antibody lateral flow immunoassay strip for rapid detection of *Acidovorax avenae* subsp *citrull.*, *Analytical Bioanalytical Chemistry*, 408(22): 6071-6078.
- [17] Chen, A., Yang, S. 2015. Replacing antibodies with aptamers in lateral flow immunoassay, *Biosensors and Bioelectronics*, 71: 230-242.
- [18] Fang, Z., Wu, W., Lu, X., Zeng, L. 2014. Lateral flow biosensor for DNA extraction-free detection of salmonella based on aptamer mediated strand displacement amplification *Biosensors and Bioelectronics*, 56, 192-197.
- [19] Park, H. C., Baig, I.A., Lee, S. C., Moon, J. Y., Yoon, M. Y. 2014. Development of ssDNA Aptamers for the Sensitive Detection of *Salmonella typhimurium* and *Salmonella enteritidis*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 174(2):793-802.
- [20] Jin, L., Wang, S., Shao, Q., Cheng, Y. 2022. A rapid and facile analytical approach to detecting *Salmonella* Enteritidis with aptamer-based surface-enhanced Raman spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 267,120625.

- [21] Huo, T. M., Peng, C. F., Xu, C. L., Liu, L. Q. 2006. Development of colloidal gold-based immunochromatographic assay for the rapid detection of medroxyprogesterone acetate residues. *Food and Agricultural Immunology*, 17:183-190.
- [22] Kaiser, L., Weisser, J., Kohl, M., & Deigner, H. P. 2018. Small molecule detection with aptamer based lateral flow assays: Applying aptamer-C-reactive protein cross-recognition for ampicillin detection. *Scientific Reports*, 8: 5628.
- [23] Zhang, G., Zhu, C., Huang, Y., Yan, J., Chen, A. 2018. A Lateral Flow Strip Based Aptasensor for Detection of Ochratoxin A in Corn Samples. *Molecules*, 23: 291.
- [24] Cam, D., Oktem, H. A. 2019. Development of rapid dipstick assay for food pathogens, *Salmonella*, by optimized parameters. *Journal of Food Science and Technology*, 56(1):140–148.
- [25] Shen, G., Zhang, S., Hu, X. 2013. Signal enhancement in a lateral flow immunoassay based on dual gold nanoparticle conjugates. *Clinical Biochemistry*, 46: 1734–1738.
- [26] Li, J., Jing, L., Song, Y., Zhang, J., Chen, Q., Wang, B., Xia, X., Han, Q. 2018. Rapid Detection of Rongalite via a Sandwich Lateral Flow Strip Assay Using a Pair of Aptamers. *Nanoscale Research Letters*, 13: 296.
- [27] Bua, T., Yaoa, X., Huangb, L., Doua, L., Zhaoa, B., Yanga, B., Lic, T., Wang J., Zhanga, D. .2020. Dual recognition strategy and magnetic enrichment based lateral flow assay toward *Salmonella enteritidis* detection. *Talanta*, 206: 120204.
- [28] Kim, E., Yang, S. M., Kim, H. Y. 2023. Development of rapid on-site detection of *Salmonella Enteritidis*, *S. Typhimurium*, and *S. Thompson* in food samples using an ultrafast PCR system. *Food Bioscience*, 56, 103242.
- [29] Zambry, N. S., Najib, M. A., Awang, M. S., Selvam, K., Khalid, M. F., Bustami, Y., Hamzah, H. H., Ozsoz, M., Manaf, A. A., Aziah, I. 2022. Aptamer-Based Electrochemical Biosensors for the Detection of *Salmonella*: A Scoping Review. *Diagnostics (Basel)*, 12(12): 3186.

Beton Basınç Dayanımı Tahmini için Özellik Mühendisliği ve Makine Öğrenimi Tabanlı Hibrit Bir Yaklaşım

Mehmet Akif Bülbül*¹

*¹ Kayseri Üniversitesi Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Yazılım Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 16.04.2024, Kabul / Accepted: 23.04.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

Anahtar Kelimeler
Özellik Mühendisliği,
Makine Öğrenimi,
Beton Basınç Dayanımı

Öz: Beton basınç dayanımı tahmini, inşaat sektöründe yapıların dayanıklılığı ve güvenliği açısından hayati önem taşır. Doğru bir tahmin, yapıların tasarımında güvenilirlik sağlar ve yapısal mühendislik projelerinin başarılı bir şekilde tamamlanmasına katkıda bulunur. Ayrıca, tahminler, malzeme seçimi ve yapısal güvenlik hesaplamaları gibi kritik kararların alınmasında da önemli bir rol oynar. Bu nedenle, beton basınç dayanımı tahmini, beton endüstrisinde kalite kontrolünün ve güvenliğin sağlanması için temel bir adımdır. Bu sebeple bu çalışmada beton basınç dayanımlarının yüksek doğrulukta tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda UCI' den (University of California Irvine) alınan Beton Basınç Dayanımı veri seti üzerinde Karar Ağaçları Regresyonu, Destek Vektör Regresyonu, Lineer Regresyon ve Sinir Ağları ile tahmin işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada veri seti üzerinde özellik mühendisliği tekniği kullanılarak 50 özelliğe sahip yeni bir veri seti daha oluşturulmuştur. Oluşturulan yeni veri seti üzerinde aynı yöntemler yeniden uygulanarak beton basınç dayanım tahminleri yapılmıştır. Özellik mühendisliği uygulanmadan yapılan tahminler ile özellik mühendisliği uygulanarak elde edilen yeni veri seti üzerinde yapılan tahminler tartışmalı ve karşılaştırılmalı bir şekilde sunulmuştur. Elde edilen bulgular Özellik mühendisliğinin çalışmada kullanılan makine öğrenimi yöntemlerinin performanslarını artırdığını gösterirken en başarılı yöntemin makine mühendisliği ve sinir ağları ile kurulan yapıdan elde edildiğini göstermektedir.

A Hybrid Approach Based on Feature Engineering and Machine Learning for Concrete Compressive Strength Prediction

Keywords
Feature Engineering,
Machine Learning,
Concrete Compressive
Strength

Abstract: Concrete compressive strength prediction is vital to the durability and safety of structures in the construction industry. An accurate prediction ensures reliability in the design of structures and contributes to the successful completion of structural engineering projects. Furthermore, predictions play an important role in making critical decisions such as material selection and structural safety calculations. Therefore, concrete compressive strength prediction is a fundamental step to ensure quality control and safety in the concrete industry. Therefore, this study aims to predict concrete compressive strength with high accuracy. For this purpose, prediction processes were performed with Decision Tree Regression, Support Vector Regression, Linear Regression and Neural Networks on the Concrete Compressive Strength data set obtained from UCI (University of California Irvine). In the study, a new dataset with 50 features was created by using feature engineering technique on the dataset. Concrete compressive strength predictions were made by reapplying the same methods on the new data set. The predictions made without applying feature engineering and the predictions made on the new data set obtained by applying feature engineering are presented in a controversial and comparative manner. The findings show that feature engineering improves the performance of the machine learning methods used in the study, while the most

successful method is obtained from the structure established with machine engineering and neural networks.

*İlgili Yazar, email: makifbulbul@kayseri.edu.tr

1. Giriş

Basınç dayanımının değeri beton yapıların güvenilir tasarımı ve güvenlik değerlendirmesinin yanı sıra betonun kalite değerlendirmesinde önemli bir rol oynar [1]. Betonun basınç dayanımı, verilen bileşenlere göre oldukça doğrusal olmayan işlevlere sahiptir [2]. Yüksek performanslı beton üretmek ciddi zaman alan, mali değerleri yüksek ve ciddi bir insan gücü gerektirir [3]. Harcanan bu zaman, maliyetten ve insan gücünden tasarruf sağlanabilmesi ancak yüksek doğruluk oranlarına sahip tahmin modellerinin geliştirilmesi ile mümkündür.

Chengquan ve arkadaşları [4], betonun basınç dayanımını belirlemek için stokastik fraktal arama, çoklu evren optimizasyonu ve girdap arama algoritması olmak üzere üç yapay zeka yöntemi kullanmışlardır. Çalışmada bu üç yöntem çok katmanlı algılayıcı ağlar ile entegre edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular beton basınç dayanımı tahmininde stokastik fraktal arama ile entegre edilen çok katmanlı algılayıcı ağların diğer yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar elde ettiğini göstermiştir.

Şarkı ve arkadaşları [5], yapmış oldukları çalışmada atık mermer tozu içeren betonun basınç dayanımının tahmininde makine öğreniminin yeteneklerinden yararlanmışlardır. Çalışmada farklı atık mermer tozu bileşimleri ve değişen su bağlayıcı oranları kullanılarak veri seti elde edilmiştir. Çoklu doğrusal regresyon, K-en yakın komşu, destek vektör regresyonu, karar ağacı, rastgele orman, ekstra ağaçlar ve gradyan artırma yöntemlerinin kullanıldığı çalışmada rastgele orman yöntemi ile diğer yöntemlerden daha yüksek R2 değeri ve daha düşük ortalama mutlak hata değeri elde edilmiştir.

Zhang ve arkadaşları [6], hibrit algoritmalar kullanılarak ultra büyük işlenebilirlik betonunun basınç dayanımı tahminini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada basınç dayanımı tahmini için nöro-bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır. Nöro-bulanık çıkarım sistemi balina optimizasyon algoritması ve parçacık sürü optimizasyon algoritması ile hibritleştirilerek iki farklı model öne sürülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda balina optimizasyon algoritması ile hibritleştirilen nöro-bulanık çıkarım sistemi hem diğer modelden hem de literatürde aynı veri seti ile yapılan diğer çalışmalardan daha başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Maheryan ve arkadaşları [7], yapmış oldukları çalışmada nano silika modifiyeli betonda basınç dayanımını tahmin etmek için farklı makine öğrenimi yöntemleri kullanmışlardır. Yapay Sinir Ağları, Doğrusal Regresyon, Karar Ağaçları, Rastgele Orman, Destek Vektör Makineleri, Stokastik Gradyan İnişi, K-en Yakın Komşu yöntemleri gibi literatürde sıkça kullanılan makine öğrenimi yöntemlerinin kullanıldığı çalışmada Rastgele Orman yöntemi ile diğer yöntemlerden daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Mustapha ve arkadaşları [8], kuaterner karışım betonun basınç dayanımının tahmini için dört farklı gradyan artırıcı algoritma kullanmışlardır. Gradyan Artırıcı Regresör, Işık Gradyan Artırma Modeli, Aşırı Gradyan Artırma ve CatBoost makine öğrenme algoritmalarının kullanıldığı çalışmada her algoritmanın hiper parametre optimizasyonu beş katlı çapraz doğrulama kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Her gradyan artırma algoritması için beş olmak üzere toplam yirmi optimal model oluşturulan çalışmada CatBoost yöntemi ile daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Zhou ve arkadaşları [9], karar ağacı modellerini kullanarak geopolimer beton basınç dayanımının tahmini etmeye çalışmışlardır. Karar ağacı, XGBoost ve Rastgele Orman yöntemlerinin kullanıldığı çalışmada modellerin doğruluğu ortalama mutlak hata, ortalama mutlak yüzde hata gibi yöntemlerle belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda XGBoost yöntemi ile geopolimer beton basınç dayanımı tahmininde daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde etmişlerdir.

Joshi ve arkadaşları [10], yüksek performanslı beton ve lif takviyeli yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen betonun basınç dayanımını üç aşamalı bir yöntemle tahmin etmeye çalışmışlardır. Ön işleme, özellik çıkarma ve tahmin aşamalarını içeren bu çalışmada Derin İnanç Ağı ve Uzun Kısa Süreli Bellek yöntemleri hibritleştirilmiştir. Ayrıca, Kaya Sırtlanları Güncellenmiş Serçe Algoritması, önerilen çalışmanın tahmin doğruluğunu artırmak için Derin İnanç Ağı'nda kullanılan ağırlıklarına ince ayar yapmak için kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular sunulan hibrit yöntemin başarısını ortaya koymuştur.

Beton basınç dayanımı tahmininde literatürde birçok farklı yöntem ve algoritma kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemler belirli bir veri seti üzerinde uygulanmış ve belirli sonuçlar elde edilmiştir. Beton basınç dayanımı

tahmininde kullanılan yöntemlerde kullanılan veri seti özellikleri genelde az ve sınırlıdır. Veri setlerinde kullanılan özelliklerin farklı yöntemler kullanılarak artırılması ve bu artırımın tahmin performansında nasıl bir etki yapacağı sorusu bu çalışmalarda eksik kalmaktadır. Bunları ışığında bu çalışmada, beton basınç dayanımı tahmini için literatürde sıkça kullanılan Karar Ağaçları Regresyonu, Destek Vektör Regresyonu, Lineer Regresyon ve Sınır Ağları yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler UCI (University of California Irvine) veri deposunda bulunan Beton Basınç Dayanımı (Concrete Compressive Strength) veri seti üzerinde çalıştırılmıştır. Daha sonra kullanılan veri setinden özellik mühendisliği kullanılarak daha fazla özelliğe sahip yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yeni veri seti ile aynı makine öğrenimi yöntemleri yeniden kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular karşılaştırmalı ve tartışmalı bir şekilde sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

Bu bölümde beton basınç dayanımı tahmin işleminde kullanılan yöntemler tanıtılacaktır.

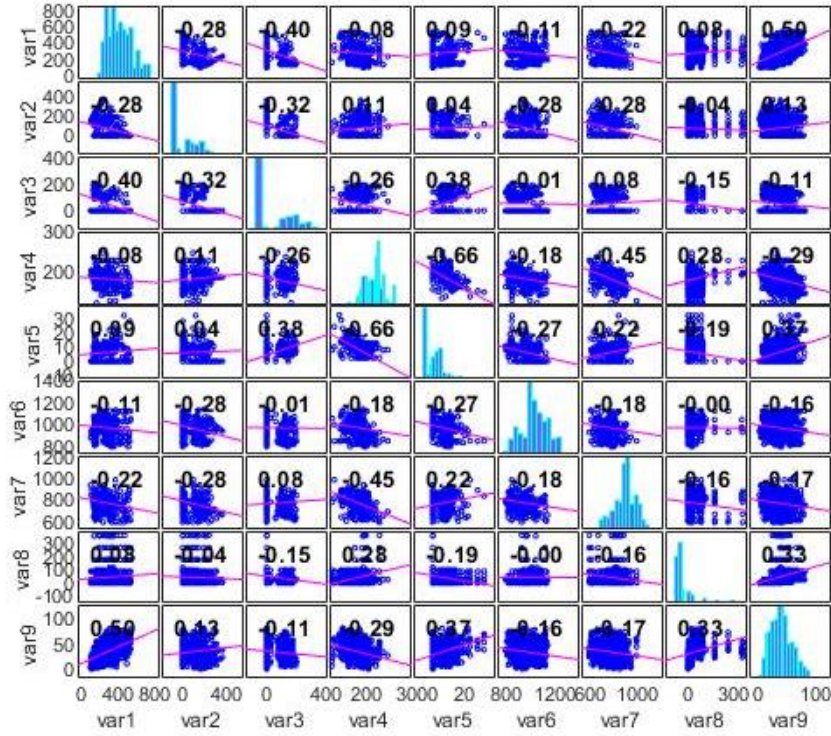
2.1. Veri Seti

Beton basınç dayanımı tahmin işlemi için Yeh tarafından oluşturulan ve UCI' de bulunan Beton Basınç Dayanımı (Concrete Compressive Strength) veri seti kullanılmıştır [11]. Veri seti içerisinde bulunan özellikler Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Beton Basınç Dayanımı veri seti özellikleri

Değişken Adları	Çalışmadaki Roller	Özellik No	Birimler
Çimento	Özellik	1	kg/m ³
Yüksek Fırın Cürufu	Özellik	2	kg/m ³
Uçucu Kül	Özellik	3	kg/m ³
Su	Özellik	4	kg/m ³
Süper akışkanlaştırıcı	Özellik	5	kg/m ³
İri Agregası	Özellik	6	kg/m ³
İnce Agregası	Özellik	7	kg/m ³
Yaş	Özellik	8	Gün
Beton basınç dayanımı	Hedef	9	Mpa

Tablo 1' de sunulan veri seti özelliklerinden 8 tanesi ile beton basınç dayanımı tahmin edilecektir. Veri seti içerisinde 1030 tane Tablo 1' de sunulan özelliklere sahip veri bulunmaktadır. Makine öğrenimi yöntemlerinde kullanılmak üzere veri seti %70 eğitim ve %30 test olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır. Çalışmada kullanılan veri seti içerisindeki özelliklerin birbirleri ile olan korelasyon grafiği Şekil 1' de gösterilmektedir.



Şekil 1. Veri seti özellikleri arasındaki korelasyon grafiği

Şekil 1' de sunulan korelasyon grafiğine bakıldığında özellikler arasında farklı korelasyonlar durumları bulunmaktadır. Özellik 6 ile özellik 5 arasında negatif yönde bir korelasyon gözlenirken özellik 5 ile özellik 9 arasında pozitif bir korelasyon gözlemlenmektedir.

2.2. Değerlendirme Metrikleri

Beton basınç dayanımı tahmin işleminde modellerin başarısını ölçmek için literatürde makine öğrenmesi yöntemlerinin başarısını ölçen metrikler kullanılacaktır. Bu metrikler Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Ortalama Karesel Hatanın Kökü (OKHK) olup bu değerlerin matematiksel formülleri Denklem 1 ve Denklem 2'de gösterilmiştir.

$$OKH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (y_i^r - y_i^p)^2 \quad (1)$$

$$OKHK = \sqrt{OKH} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (y_i^r - y_i^p)^2} \quad (2)$$

Denklem 1 ve Denklem 2'te, y^r gerçek değerlerin tahmin edilen değerlerini, y^p tahmin edilen değerleri temsil eder. Bu değerlendirme metrikleri makine öğreniminde tahmin edilen değerlerin doğruluğunu ölçmek için kullanılmaktadır [12].

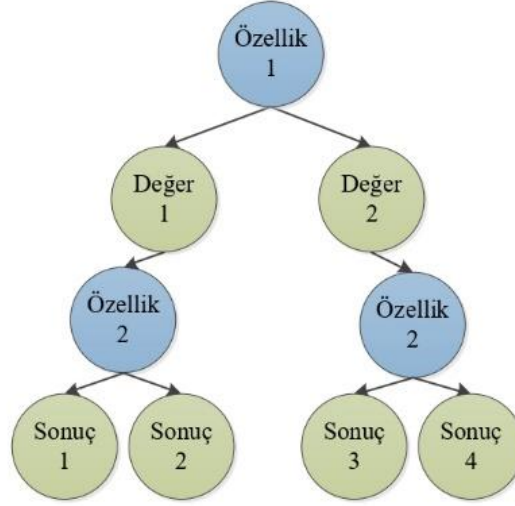
2.3. Özellik Mühendisliği

Özellik mühendisliği, model performansını iyileştirmek için ham verilerden ilgili özelliklerin veya niteliklerin oluşturulmasını ve seçilmesini içeren, makine öğrenimi ve veri biliminin kritik bir yönüdür [13]. Bir modele daha bilgilendirici girdi değişkenleri sağlayarak modelin tahmin gücünü artırmayı amaçlayan özellik çıkarma, dönüştürme ve seçme gibi bir dizi tekniği kapsar. Özellik mühendisliği genellikle veri içindeki temel kalıpları ve ilişkileri yakalayan anlamlı özellikleri tanımlamak için alan bilgisini içerir. Ölçeklendirme, kategorik değişkenleri kodlama, eksik değerleri işleme ve etkileşim terimleri oluşturma gibi teknikler, verileri modellemeye hazırlamak için özellik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılır [14]. Sonuçta etkili özellik mühendisliği, makine öğrenimi modellerinin doğruluğunu ve genelleştirilmesini önemli ölçüde etkileyerek gerçek dünya verilerinin karmaşıklığını daha iyi yakalamalarını sağlar.

Çalışmada Tablo 1’de sunulan özelliklere ait veri seti özellik mühendisliği kullanılarak özellik sayısı artırılmıştır. Oluşturulan yeni veri seti üzerinde 50 farklı özellik bulunmaktadır. Bu sayı yapılan deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Bu özellik artırımı MATLAB platformunda gerçekleştirilmiştir.

2.4. Karar Ağacı Regresyonu

Karar ağacı (KA), her bir düğümde rastgele sayıda alt düğüm ve dallara sahip bir ağaç veri yapısıdır. Bir düğümün çıkışları olan alt düğümlere iç düğüm denir; diğer düğümlere ise yaprak denir. Bu yapı, regresyon veya sınıflandırma gibi işlemlerde kullanılır. Belirli bir fonksiyonla ilgili bir iç düğüm tarafından verilen girdi değişkenlerinin değerlerine göre, veri kümesi iki veya daha fazla gruba bölünür [15]. Basit bir KAR yapısı Şekil 2’de gösterilmektedir.

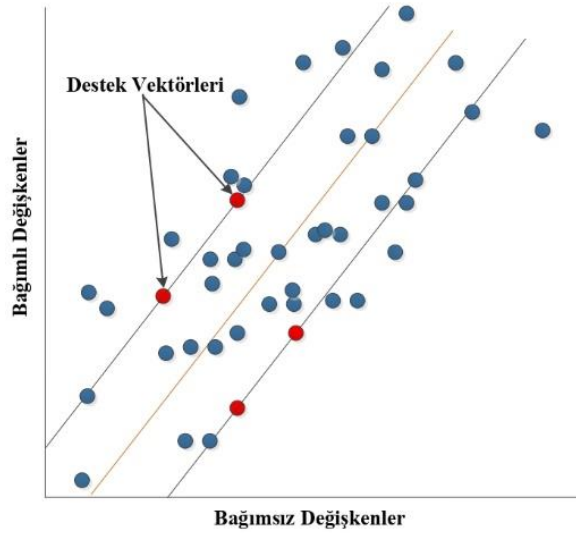


Şekil 2. KAR yapısı

Karar ağacı modeli, ağaçtaki her bölmede her bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisini hesaplamak için tüm girdi özniteliklerini değerlendirir. Bu işlem modelde özyinelemeli olarak gerçekleştirilir ve sonuç olarak bir karar ağacı oluşturulur [16].

2.5. Destek Vektör Regresyonu

Destek Vektör Regresyonu(Support Vector Regression-SVR), istatistiksel öğrenme teorisine ve yapısal risk minimizasyonu ilkesine dayanmaktadır [17]. SVR küçük örneklem büyüklükleri ve yüksek boyutlara sahip doğrusal olmayan problemlerin ele alınmasında benzersiz avantajlara sahiptir. SVR İnşaat mühendisliği problemlerinde daha yüksek doğrulukla etkin bir şekilde kullanılabilen kararlı algoritmalarından biridir [18]. Basit bir SVR yapısı Şekil 3’de gösterilmektedir.

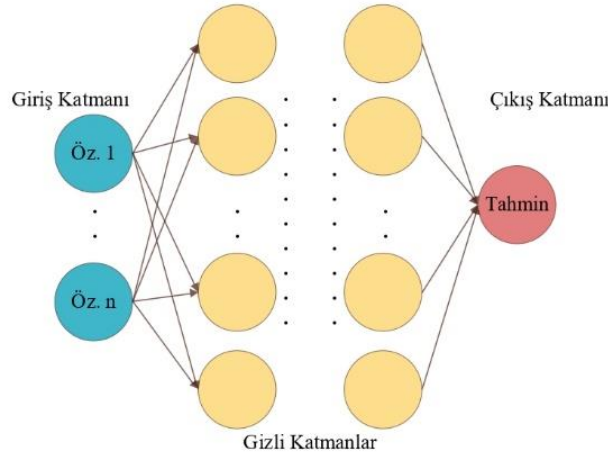


Şekil 3. SVR yapısı

Şekil 3'de görüldüğü gibi SVR veri noktalarının marjinal hatayla çevrelenmesini sağlar. Her bir veri noktasının hiper düzlem ile ne kadar uyduğunu buradaki marjinal hata belirler. Bu hata en aza indirgenerek model tahmin yeteneğini artırır.

2.6. Yapay Sinir Ağları

Yapay Sinir Ağları (YSA), regresyon problemlerini çözmek için kullanılan güçlü bir makine öğrenimi tekniğidir [19]. Regresyon modelleri, bir bağımlı değişkenin bir veya daha fazla bağımsız değişkene bağlı olduğu ilişkiyi modellemeyi amaçlar. Yapay sinir ağları, karmaşık veri setlerindeki bu ilişkileri keşfetmek ve öngörmek için kullanılır [20]. Basit bir YSA yapısı Şekil 4' de gösterilmektedir.



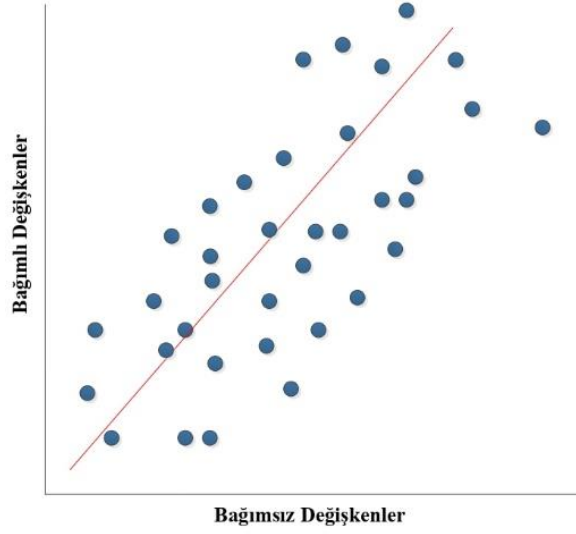
Şekil 4. YSA yapısı

Şekil 4'de görüldüğü gibi YSA yapısı üç ana katmandan oluşmaktadır. Veri akış yönü giriş katmanından çıkış katmanına doğru ilerlemektedir. Ağ, giriş özelliklerinden çıktı tahminini üretmek için katmanlar arasındaki ağırlıkları ayarlar ve veriye uyum sağlar. Eğitim sürecinde, ağ gerçek çıktılar ile tahmin edilen çıktılar arasındaki farkı minimize etmek için optimizasyon algoritmaları kullanır. Bu şekilde, yapay sinir ağları regresyon problemlerini çözer ve veriler arasındaki karmaşık ilişkileri modellemeye yardımcı olur.

2.6. Lineer Regresyon

Lineer Regresyon (LR), değişkenlerin bağımsız ve özdeş olarak dağıldığı varsayımına sahip istatistiksel bir modeldir. Basit ve çok değişkenli doğrusal regresyon, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiyi

ifade eden matematiksel modelleri bulmayı ve bu modelleri kullanarak bağımlı değişken hakkında geleceğe yönelik tahminler yapmayı amaçlar [21]. Yüksek boyutlu veri kümelerinde, birçok değişken veya özellik, hedef veya yanıt değişkeniyle ilgisiz veya gereksiz olabilir [22]. Basit LR grafiği Şekil 5’ de gösterilmektedir.

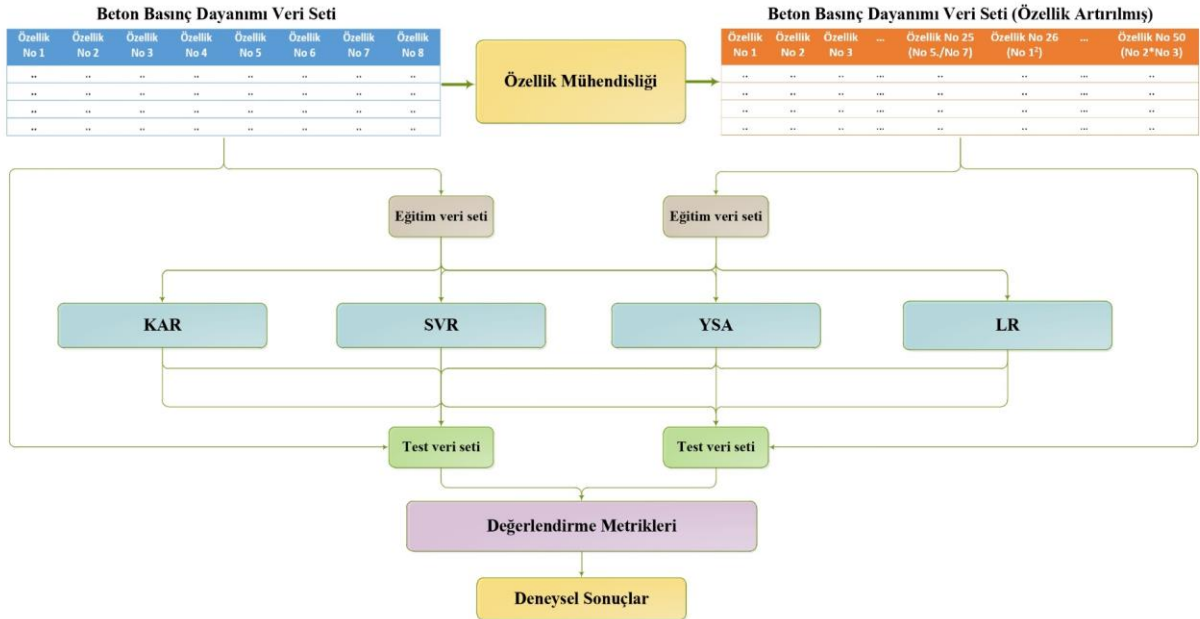


Şekil 5. LR yapısı

Şekil 5’ de sunulan grafik bağımsız bir değişkenin bağımlı bir değişken ile olan ilişkisini göstermektedir.

3. Bulgular

Beton basınç dayanımı tahmini için çalışmada kullanılan metodolojinin diyagramı Şekil 6’da gösterilmektedir.



Şekil 6. Çalışmada kullanılan metodoloji diyagramı

Şekil 6’ da sunulan diyagramda öncelikle beton basınç dayanımı tahmini için kullanılan veri seti üzerinde farklı makine öğrenimi yöntemleri kullanılacaktır. Daha sonra özellik mühendisliği kullanılarak mevcut veri setinden üretilen ve daha fazla özelliğe sahip yeni veri seti üzerinde aynı makine öğrenimi yöntemleri beton basınç dayanımını tahmin edeceklerdir. Şekil 6’ da sunulan mimari çok boyutlu problem çözümlerinde sunmuş olduğu kodlama kolaylığı nedeniyle MATLAB platformunda gerçekleştirilmiştir. Her iki veri seti üzerinde aynı yöntemlerle elde edilen bulgular tartışmalı bir şekilde sunulacaktır.

Şekil 6' da sunulan veri setleri üzerinde her iki veri seti de %70 eğitim ve %30 test olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır. Eğitim veri seti ile eğitilen makine öğrenimi yöntemlerinin başarıları daha sonra karşılaştırmaları test verileri ile ölçülmektedir. Ham veri seti üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ile test veri seti üzerinden modellerin yapmış oldukları tahminlerin performansları Eşitlik 1-4' e göre hesaplanmış ve Tablo 2' de sunulmuştur.

Tablo 2. Veri seti üzerinde makine öğrenimi yöntemlerinin performansları

Modeller	OKH	OKHK
KAR	157,50	12,55
SVR	130,65	11,43
YSA	138,53	11,77
LR	129,96	11,40

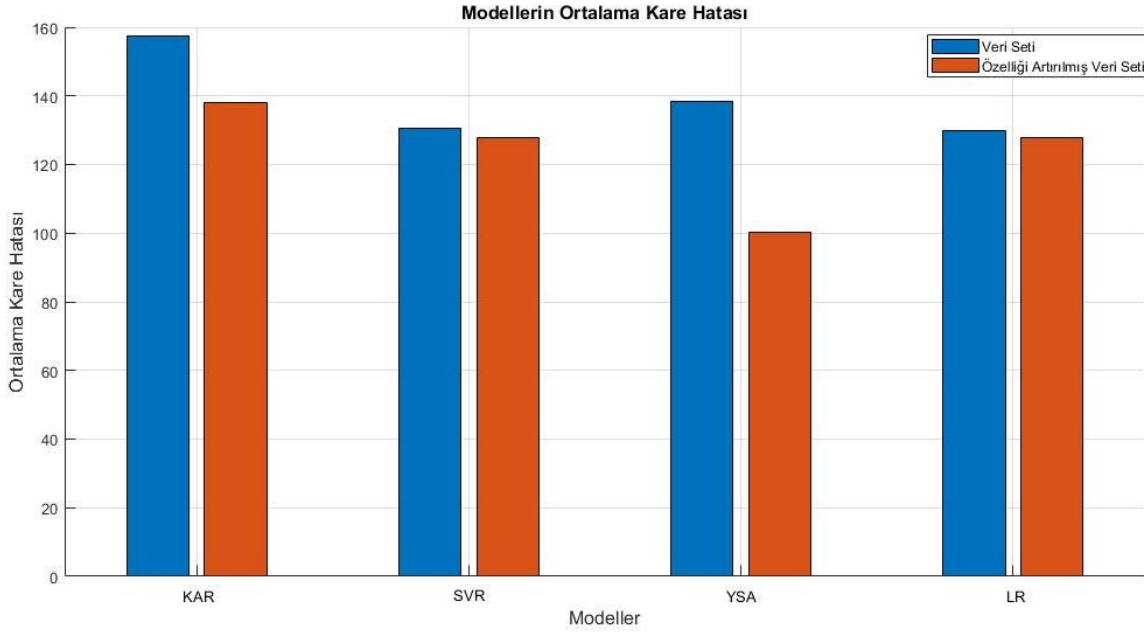
Tablo 2'de görüldüğü üzere özellik mühendisliği uygulanmamış veri seti üzerinde çalıştırılan makine öğrenme yöntemleri üzerinde en başarılı model LR modelidir.

Deneysel çalışmaların ikinci bölümünde özellik mühendisliği ile elde edilen veri seti üzerinde aynı modeller çalıştırılmış ve deneysel sonuçlar Tablo 3' de sunulmuştur.

Tablo 3. Özellik mühendisliği ile genişletilmiş veri seti üzerinde makine öğrenimi yöntemlerinin performansları

Modeller	OKH	OKHK
Özellik Mühendisliği + KAR	138,06	11,75
Özellik Mühendisliği + SVR	127,69	11,30
Özellik Mühendisliği + YSA	100,20	10,01
Özellik Mühendisliği + LR	127,69	11,30

Çalışmada kullanılan veri setleri ve kullanılan bütün modellerin performanslarının karşılaştırılmış hali Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Her iki veri setinde uygulanan yöntemlerin OKH performansları

Şekil 7'de görüldüğü üzere veri seti üzerinde uygulanan özellik mühendisliği ile özellik artırılma işlemi sonucunda YSA modelinin performansında ciddi bir artış söz konusu olmuştur. Aynı zamanda özellik mühendisliği uygulanmayan veri seti üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda en başarılı model LR iken veri seti üzerinde özellik mühendisliği uygulandıktan sonra en başarılı model YSA olmuştur.

4. Tartışma ve Sonuç

Beton basınç dayanımı tahmini, inşaat mühendisliği ve malzeme bilimi alanlarında temel konulardan bir tanesidir. Beton, yapıların mekanik dayanıklılığını sağlayan kilit bir yapı malzemesidir ve bu nedenle basınç dayanımının doğru bir şekilde tahmin edilmesi önemlidir. Basınç dayanımını belirleyen faktörler arasında birçok faktör vardır ve bu faktörlerin karmaşıklığı ve etkileşimi, tahmin sürecini zorlaştırır. Bu zorluluk beraberinde deneysel ve analitik çalışmaları gerektirir. Betonun basınç dayanımının doğru tahmini, yapısal mühendislik projelerinin başarılı bir şekilde tamamlanması ve yapıların dayanıklılığı ve güvenliği için kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada beton basınç dayanımını tahmin etmek için literatürde sıkça kullanılan KAR, SVR, YSA ve LR makine öğrenme yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler halka açık bir şekilde UCI veri deposunda bulunan Beton Basınç Dayanımı veri seti üzerinde uygulanmıştır. Bununla birlikte veri seti üzerine özellik mühendisliği uygulanarak veri seti özellikleri 50 ye çıkarılmıştır. Oluşturulan bu yeni veri seti üzerinde aynı makine öğrenimi yöntemleri tekrar uygulanmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular özellik mühendisliği ile birlikte YSA kullanımının her iki veri seti üzerinde yapılan diğer deneysel çalışmalardan daha etkili ve verimli sonuçlar elde ettiğini göstermiştir.

Ayrıca deneysel çalışmalar özellik mühendisliği ile birleştirilen yöntemlerin daha iyi performans ortaya koyduklarını da göstermiştir. Bu yöntem özellikle az özelliğe sahip veri setleri üzerinde daha performanslı sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.

İleriki çalışmalarda özellik mühendisliği ve YSA ile kurulan yapı temel alınarak beton basınç dayanımı tahmini için uygulamalar geliştirilebilir.

Kaynakça

- [1] Vu, C. C., Tran, H. H. 2023. Performance analysis of methods to estimate Weibull parameters for the compressive strength of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02330. doi:10.1016/j.cscm.2023.e02330.
- [2] Li, W., Wang, R., Ai, Q., Liu, Q., Lu, S. X. 2023. Estimation of compressive strength and slump of HPC concrete using neural network coupling with metaheuristic algorithms. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 1-15. doi:10.3233/JIFS-230005.
- [3] Weng, P., Xie, J., Zou, Y. 2023. Compressive strength prediction of admixed HPC concrete by hybrid deep learning approaches. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 44(5), 8711-8724. doi:10.3233/JIFS-221714
- [4] Chengquan, Z., Aghajaniifah, H., Zykova, K. I., Moayedi, H., Le, B. N. 2023. Predicting concrete's compressive strength through three hybrid swarm intelligent methods. *Computers and Concrete*, 32(2), 149-163. doi:10.12989/cac.2023.32.2.149.
- [5] Singh, M., Choudhary, P., Bedi, A. K., Yadav, S., Chhabra, R. S. 2022. Compressive Strength Estimation of Waste Marble Powder Incorporated Concrete Using Regression Modelling. *Coatings*, 13(1), 66. doi:10.3390/coatings13010066.
- [6] Zhang, Y., Bai, Z., Zhang, H. 2023. Compressive strength estimation of ultra-great workability concrete using hybrid algorithms. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 6(3), 389-400. doi:10.1007/s41939-023-00145-0.
- [7] Maherian, M. F., Baran, S., Bicakci, S. N., Toreyin, B. U., Atahan, H. N. 2023. Machine learning-based compressive strength estimation in nano silica-modified concrete. *Construction and Building Materials*, 408, 133684. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.133684.
- [8] Mustapha, I. B., Abdulkareem, M., Jassam, T. M., AlAteah, A. H., Al-Sodani, K. A. A., Al-Tholaia, M. M., Nabus, H., Alih, S. C., Abdulkareem, Z., Ganiyu, A. 2024. Comparative Analysis of Gradient-Boosting Ensembles for Estimation of Compressive Strength of Quaternary Blend Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 18(1), 1-24. doi: 10.1186/s40069-023-00653-w.
- [9] Zhou, J., Su, Z., Hosseini, S., Tian, Q., Lu, Y., Luo, H., Xu, X., Huang, J. 2024. Decision tree models for the estimation of geo-polymer concrete compressive strength. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 21(1), 1413-1444. doi: 10.3934/mbe.2024061.
- [10] Joshi, D. A., Menon, R., Jain, R. K., Kulkarni, A. V. 2023. Deep learning based concrete compressive strength prediction model with hybrid meta-heuristic approach. *Expert Systems with Applications*, 233, 120925. doi:10.1016/j.eswa.2023.120925.
- [11] Yeh, I. C. 1998. Modeling of strength of high-performance concrete using artificial neural networks. *Cement and Concrete research*, 28(12), 1797-1808. doi:10.1016/S0008-8846(98)00165-3.
- [12] Konak, F., Bülbül, M. A., Türkoğlu, D. 2024. Feature Selection and Hyperparameters Optimization Employing a Hybrid Model Based on Genetic Algorithm and Artificial Neural Network: Forecasting Dividend Payout Ratio. *Computational Economics*, 63, 1673-1693. doi:10.1007/s10614-023-10530-z.
- [13] Liu, M., Guo, C., Xu, L. 2024. An interpretable automated feature engineering framework for improving logistic

- regression. *Applied Soft Computing*, 153, 111269. doi:10.1016/j.asoc.2024.111269.
- [14] Xiang, Y., Pei, X., Zhang, Y., Jiang, D. 2023. Feature-Engineering Enabled Multi-Objective Evolutionary Impedance Fitting Technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. doi:10.1109/TIE.2023.3288191.
- [15] Pekel, E. 2020. Estimation of soil moisture using decision tree regression. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(3), 1111-1119. doi:10.1007/s00704-019-03048-8.
- [16] Chowdhury, M. S., Rahaman, M. N., Sheikh, M. S., Sayeid, M. A., Mahmud, K. H., Hafsa, B. 2024. GIS-based landslide susceptibility mapping using logistic regression, random forest and decision and regression tree models in Chattogram District, Bangladesh. *Heliyon*, 10(1). doi:10.1016/j.heliyon.2023.e23424.
- [17] Huo, D., Chen, J., Wang, T. 2024. Chaos-based support vector regression for load power forecasting of excavators. *Expert Systems with Applications*, 246, 123169. doi:10.1016/j.eswa.2024.123169.
- [18] Yaswanth, K. K., Sathish Kumar, V., Revathy, J., Murali, G., Pavithra, C. 2024. Compressive strength prediction of ternary blended geopolymer concrete using artificial neural networks and support vector regression. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(2), 32. doi:10.1007/s41062-023-01343-y.
- [19] Eskandari, M., Zeinadini, A., Seyedmohammadi, J., Navidi, M. 2023. Estimating quantity of date yield using soil properties by regression and artificial neural network. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54(1), 36-47. doi:10.1080/00103624.2022.2109661.
- [20] Bülbül, M. A. 2024. Optimization of artificial neural network structure and hyperparameters in hybrid model by genetic algorithm: iOS-android application for breast cancer diagnosis/prediction. *The Journal of Supercomputing*, 80(4), 4533-4553. doi:10.1007/s11227-023-05635-z.
- [21] Türkmen, V., Doğukan, Ö. 2023. Makine Öğrenmesinde Regresyon Algoritmalarının Veteriner Hekimliği Alanında Uygulamaları. *Veteriner Farmakoloji ve Toksikoloji Derneği Bülteni*, 14(3), 118-132. doi:10.38137/vftd.1307581.
- [22] Wichitaksorn, N., Kang, Y., & Zhang, F. 2023. Random feature selection using random subspace logistic regression. *Expert Systems with Applications*, 217, 119535. doi:10.1016/j.eswa.2023.119535.

2015-2021 Yılları Arasında Muğla İlinde LTO Döngüsü Esnasında B737-800 ve A320 Tip Uçaklardan Kaynaklanan Emisyonun Gerçek Zamanlı Hesaplanması

Ozan Öztürk^{*1,2} , Murat Taştan³ 

*¹ Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Uçak Gövde Motor Bakım, MUĞLA

²Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık ABD, KAYSERİ

³Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Gövde Motor Bakım, KAYSERİ

(Alınış / Received: 06.02.2024, Kabul / Accepted: 14.03.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

Anahtar Kelimeler

Dalaman Havalimanı,
Milas-Bodrum Havalimanı,
Emisyon Gazı Salınımı,
CO Emisyonu,
NO_x Emisyonu,
HC Emisyonu

Öz: Son yıllarda en çok mücadele edilen konulardan biri, uçaklar tarafından atmosfere salınan emisyon gazlarıdır. Bu çalışmada, 2015-2021 yılları arasında Dalaman Havalimanı (IATA: DLM, ICAO: LTBS) ve Milas-Bodrum Havalimanı (IATA: BJV, ICAO: LTFE) LTO (Kalkış, Tırmanış ve İniş) sürecinde en sık kullanılan uçak tipleri olan B737-800 ve A320 uçaklarından kaynaklanan emisyon gazları (HC, CO ve NO_x) hesaplanmıştır. Muğla, yılda yaklaşık 6 aylık bir turizm sezonu ile ana turizm destinasyonu olduğundan, Dalaman ve Milas-Bodrum havalimanları Türkiye'nin en yoğun havalimanları arasında yer almaktadır. Hesaplama kullanılan yakıt oranları ve emisyon faktörleri ICAO ve Motor Veri Bankasından alınmıştır. Uçuş verileri ise DHMİ'den temin edilmiştir. Yapılan çalışmada salınan emisyon gazları, Tier 2 yöntemiyle hesaplanmıştır. NO_x emisyonu en çok kalkış ve tırmanış fazında görünürken, CO ve HC emisyonları en çok taksi fazında gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, kalkış ve tırmanış fazlarında motor itki gücünün diğer fazlardan daha yüksek olmasıdır. Taksi fazında ise motor itki gücü en düşük seviyededir, bu nedenle CO ve HC emisyonları daha fazladır.

Real-Time Calculation of Emissions from B737-800 and A320 Aircraft During the LTO Cycle in Muğla Province Between 2015-2021

Keywords

Dalaman Airport,
Milas-Bodrum Airport,
Emission Gas Release,
CO Emission,
NO_x Emission,
HC Emission

Abstract: One of the most challenging issues in recent years is the emission gases released into the atmosphere by aircraft. In this study, emissions gases (HC, CO, and NO_x) originating from B737-800 and A320 aircraft, which are among the most frequently used aircraft types in the LTO (Landing and Take-Off) process at Dalaman Airport (IATA: DLM - ICAO: LTBS) and Milas-Bodrum Airport (IATA: BJV, ICAO: LTFE) between 2015 and 2021 have been calculated. Muğla, being a primary tourism destination with approximately a six-month tourism season, Dalaman and Milas-Bodrum airports are among the busiest airports in Turkey. The fuel ratios and emission factors used in the calculations were obtained from ICAO and the Engine Data Bank. Flight data was obtained from DHMI. Emission gases released were calculated using the Tier 2 method. NO_x emissions are most visible during take-off and climb phases, while CO and HC emissions are most prominent during the Taxi phase. This is because the engine thrust power is higher during take-off and climb phases than in other phases. In the Taxi phase, engine thrust power is at its lowest level, which is why CO and HC emissions are more prominent.

*İlgili Yazar, email: ozturkozan@mu.edu.tr

1. Giriş

Havacılık endüstrisi, farklı insanları, kültürleri ve ticari faaliyetleri birbirine bağlayan küresel bir endüstridir [1]. Bugün dünya nüfusunun %51'i uluslararası bir havalimanına yakın yaşarken, %74'ü herhangi bir havalimanına 100 km altında mesafede bulunmaktadır [2]. Küresel havacılığın hızlı büyümesi, uçak motoru emisyonlarıyla ilişkili çevresel endişeleri gündeme getirmiştir. Havacılık, modern hayatımızda kritik bir rol oynarken, uçak motorlarından kaynaklanan emisyonlar hava kirliliğine, iklim değişikliğine ve diğer çevresel etkilere sahip olsa da diğer kaynaklara göre az etkisi vardır [3].

Motor içerisinde meydana gelen yanma sonucu CO, CO₂, SO₂, NO_x gibi emisyon gazları ve partiküller oluşur. Oluşan NO_x emisyonu aşırı yanma sonucu açığa çıkmaktadır. Diğer bir yanma ürünü olan CO emisyonu ise düşük ısılarda yanma sonucu oluşur. Havacılık endüstrisinde hava kirliliği ile mücadele etmenin bir yolu, yanmanın kusursuz olmasını sağlamaktır [4].

Uçaklardan kaynaklanan egzoz emisyonları, insan kaynaklı yüzey emisyonlarına kıyasla daha küçük olduğu pek çok çalışmada kanıtlanmıştır. Tüm petrol ürünlerinin yaklaşık %6'sı havacılık yakıtı olarak kullanılmaktadır. Toplam insan kaynaklı CO₂ emisyonunun yaklaşık %2,6'sı havacılığın endüstrisinden kaynaklanmaktadır. İnsan kaynaklı tüm NO_x emisyonunda havacılığın etkisi %3'ü kadardır. Bununla birlikte, uçak emisyonlarının üst atmosferdeki benzersiz konumu ve hava trafiğinde öngörülen büyüme, bu emisyonların etkilerine özellikle dikkat edilmesini gerektirmektedir [5,6,7].

Çeşitli araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, Türkiye'deki havaalanları ve uçaklardan kaynaklanan kirlenici emisyonları analiz etmiştir. Kesgin [8], 2001 yılında Türkiye'deki havaalanları için LTO döngüsünde salınan kirlenici emisyonları hesaplayarak Atatürk Havaalanı için en yüksek ve en düşük emisyon miktarlarını belirlemiştir. Schafer ve ark. [9], uzaktan tespit yöntemiyle Frankfurt, Londra ve Viyana havaalanlarının uçak egzoz emisyonlarını incelemiş ve NO_x emisyonlarının ICAO verilerine göre %50 daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Eysers ve ark. [10], 2002 verileriyle 2025 yılı için kirlenici emisyon tahminleri yapmış ve CO₂ ve NO_x emisyonlarının artacağını öngörmüştür. Fleuti ve Polymeris [11], Zürih Havaalanı'ndaki uçakların LTO döngülerini inceleyerek ICAO LTO döngüsüne göre farklılıklar olduğunu göstermiştir. Schürmann ve ark. [12], Zürih Havaalanı'ndaki uçaklardan kaynaklanan emisyonların yerel hava kalitesine etkisini ölçmüş ve CO ve NO emisyonlarının kaynaklarını belirlemiştir. Elbir [13], Adnan Menderes Havalimanı için uçaklardan kaynaklanan emisyonları hesaplamıştır. Gökçek ve Bekdemir [14], Türkiye'nin dört büyük havalimanının NO_x emisyonlarını incelemiştir. Ünal A. [15], Atlanta Havalimanı'ndaki kirlenicileri araştırarak partikül madde emisyonlarının ozon gazı emisyonlarından daha fazla olduğunu göstermiştir. Carslaw ve ark. [16], Heathrow Havalimanı'ndaki NO_x emisyonlarının toplam kirleniciler içindeki oranını belirlemiş ve etkilerini uzak mesafeye taşıdığını göstermiştir. Winther ve ark. [17], Kopenhag Havalimanı için emisyon hesaplamaları yapmıştır. Steib ve ark. [18], Macaristan Budapeşte Ferihegy Havalimanı'ndaki uçaklardan kaynaklanan emisyonları incelemiş ve büyük uçaklarda yardımcı güç üniteleri kullanıldığını belirtmiştir. Nikoleris ve ark. [19], 2011 yılında, Dallas/Fort Worth Havalimanı'ndaki uçak operasyonlarına ait yakıt tüketimi ve buna bağlı emisyon değerlerinin tahmin etmeye çalışmışlardır. Çağatan [20], Atatürk Havalimanı'nın çevresel etkilerini belirlemiştir. Öztürk [21], Kayseri Erkilet Havalimanı için emisyonları hesaplamıştır. Altuntaş ve Karakoç [22], iç hat uçuşlarının uçak seçimindeki etkilerini araştırmış ve bölgesel jet uçaklarının kullanılmasının olumlu sonuçlar doğurabileceğini göstermiştir. Yılmaz ve İlbaş [23], gaz türbinli motorlardan kaynaklanan kirlenici emisyonları incelemiştir. Çizmecioglu [24], Türkiye'deki sivil havacılığı değerlendirmiş ve sivil havacılığın ekonomik etkilerini araştırmıştır. Ünal ve ark. [25], Nevşehir Kapadokya Havalimanı'ndaki gürültü ve emisyon ölçümlerini yapmıştır. Canarslanlar [26], iç hat uçuşlarının yakıt tüketimi ve emisyonlarının Hava Sahası ve Trafik Yönetimi ile ilişkisini incelemiştir. Babaoğlu ve Özgünoğlu [27], Kahramanmaraş Havalimanı'ndan kaynaklanan kirlenici gazları tahmin etmiştir. Şekertekin [28], Türkiye iç hat uçuşlarının LTO operasyonlarından kaynaklanan kirlenici emisyonlarına odaklanmıştır. Yılmaz [29], Kayseri Erkilet Havalimanı LTO Safhasında Hava Kirlenicileri (HC, CO, NO_x) Hesaplanmıştır. Kuzu [30], İstanbul Atatürk Havalimanı LTO Emisyonlarının Hesaplanması ve Çevreye Dağılımının Modellenmesi üzerine çalışmıştır. Kumaş ve diğerleri [31], Dalaman Havalimanı LTO Safhasında Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi konusunda araştırma yapmışlardır. Ekici ve Şöhret [32], Isparta Süleyman Demirel Havaalanı'nda Emisyonları, Çevresel Etkileri ve Emisyon Ekonomisini incelemiştir. Keskin ve Ercoşkun [33], Adnan Menderes Havalimanı LTO Safhasında Emisyonların Çevreye Etkisinin İncelemişlerdir. Genç [34], Malatya Erhaç Havalimanı için emisyonları hesaplamıştır. Öz ve Ercoşkun [35], Esenboğa Havalimanı LTO Safhasında Emisyonların Çevreye Etkisinin İncelenmesi üzerine çalışmışlardır. Yıldız [36], çalışmasında uçakların elektrik kullanımının önemini araştırmıştır. Çalışmasında elektrik kullanmanın uçak emisyonlarında yaklaşık %20, gürültüsünde %50 ve yakıt tüketiminde ise %20 azalma sağlayabileceğini tespit etmiştir. Yıldız ve ark. [37] çalışmalarında hibrit uçak tahrikinde kullanılmak üzere elektrik enerjisinin ve geleneksel jet yakıtının WTP emisyonlarını analiz etmişlerdir. Emisyon hesaplamalarının gelecek projeksiyonu, daha fazla yenilenebilir kaynaktan elektrik üretmenin genel emisyonlarda yalnızca %50'lik bir azalma sağladığını tespit etmişlerdir.

Dünyada havaalanlarındaki uçak emisyonlarını tahmin etmeye yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Uçak emisyonlarıyla ilgili ilk çalışmalar, başlangıçta sınırlı sayıda gaz üzerinde odaklanmış olsa da 1980'lerde ve 1990'larda araştırmacılar, egzoz gazlarının detaylı kimyasal bileşimine ek olarak, uçak türbin motorları tarafından yayılan parçacıkların kimyasal ve fiziksel özelliklerini inceleyerek odak noktasını genişletmişlerdir [38].

Amerikan hükümeti tarafından yapılan çalışma, havaalanı kaynaklı emisyonların hesaplanmasına yönelik ilk girişimlerden biridir. EPA Raporu, 5 ana bölüm ve A'dan H'ye kadar olan 8 ekten oluşmaktadır. Raporu, 1970 ile 1995 arasında uçak emisyonlarının trendini gösteren veriler sunulmuş, 2010 yılı için tahminler yapılmıştır [39]. Bajgai ve Shrestha [40], Tribhuvan Uluslararası Havalimanı'ndan (TIA) kaynaklanan iniş ve kalkış döngüsü (LTO) emisyonlarının ve bu emisyonların Katmandu vadisindeki ortam hava kalitesine olan etkilerini araştırmışlardır. Yazarlar, LTO emisyonlarının yılda 898 ila 2123 ton arasında değiştiğini hesaplayarak, bu emisyonların hava kalitesine en yüksek etkiyi muson öncesi mevsimde gösterdiğini belirtmişlerdir.

Cao ve arkadaşları [41], çeşitli taksi yapma yöntemlerini karşılaştırmış ve farklı taksi yapma yöntemlerindeki emisyonları hesaplayarak çevresel etkilerini değerlendirmişlerdir. Çin, Xining Uluslararası Havalimanı'ndan alınan fiili operasyonel verilere dayanan değerlerde beş taksi yöntemi için yakıt tüketimi ve kirlenici emisyon karşılaştırmaları yapmıştır. Bu yöntemler arasında tam motorlu taksi, tek motorlu taksi, sevk çekme, yerleşik sistemler ve yüzey trafik yönetimi bulunmaktadır. Sonuçlar, yeni yöntemlerin geleneksel yöntemlere göre daha çevre dostu olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 2024-2035 yılları arasında yapılan tahminler de sunulmuştur.

Görüldüğü gibi, uçak emisyonları konusu son yılların en trend konularından biridir ve bu alanda çok sayıda bilimsel çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma, Dalaman Havalimanı ve Milas-Bodrum Havalimanı'nda 2015-2021 yılları arasında gerçekleşen LTO süreçlerinde B737-800 ve A320 uçaklarından kaynaklanan emisyon gazlarını (HC, CO ve NO_x) analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bu araştırma, ICAO ve Motor Veri Bankası'ndan alınan yakıt oranları ve emisyon faktörleri kullanılarak Tier 2 yöntemini temel almaktadır. Çalışmanın özgünlüğü, Muğla ili için 2015-2022 yılları arasında hesaplanan emisyon değerlerine dayanarak geleceğe yönelik tahminlerde bulunmaktadır. Çalışma, 2020 pandemi dönemini ve sonrasını da içermektedir. Ana hedef, kişi başı emisyonları hesaplamak ve azaltmak için önerilerde bulunarak çevresel etkileri anlamak ve minimize etmektir.

2. Materyal ve Metot

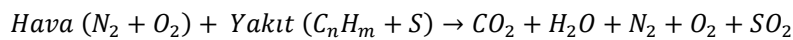
Çalışmada salınımı hesaplanan CO emisyonu yanmanın düşük sıcaklıkta gerçekleştiği zaman görülen ve canlılar için son derece tehlikeli olan zehirli bir emisyon gazıdır. Diğer hesaplanan NO_x' in yanma sırasında yüksek sıcaklıkta tepkimeye giren nitrojen atomuyla (N) oksijen moleküllerinden (O₂) oluşan nitrik oksit gazı (NO) ve nitrojen dioksit NO₂ gazıdır [4]. Dalaman (IATA: DLM- ICAO: LTBS) ve Milas- Bodrum havalimanı (IATA: BJV, ICAO: LTFE) için 2020-2022 yılları arasında kalkış ve iniş süreçlerinde uçakların CO ve NO_x salınımları hesaplanmıştır. Yakıt oranları ve emisyon faktörleri ICAO ve Motor Veri Bankasından alınmıştır. İlgili havaalanının 2020-2022 yılları arasında ait uçuş verileri DHMİ'den alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, uçuş zarfının kalkış, tırmanış, iniş ve taksi görevlerine göre, 2015-2021 yılları için NO_x, HC ve CO emisyonlarını iç ve dış hat ayrımı yaparak hesaplanmıştır. Her iki havalimanı için emisyon hesaplamada kullanılan yöntem Tier 2 metodudur.

2.1. Uçak Emisyonlarının Hesaplanması

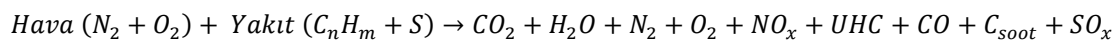
Havacılık tarafından üretilen kirlenitçiler, uçaklarda yakıt olarak kullanılan jet yakıtı ve havacılık benzininin (bu, yalnızca küçük uçaklar ve piston motorlara sahip helikopterler tarafından kullanılır) yanması sonucunda ortaya çıkar. Ana emisyon türleri şunlardır: CO₂, NO_x, H₂O buharı, CH₄, CO, SO_x, metan dışı uçucu organik bileşikler, partikül madde (PM).

Aşağıda bir uçak motorundaki hava-yakıt akışını ve yanma süreci verilmiştir. Kimyasal süreç sonunda elde edilen emisyon gazları ve partiküller aşağıda verilmiştir [42].

İdeal Yanma;



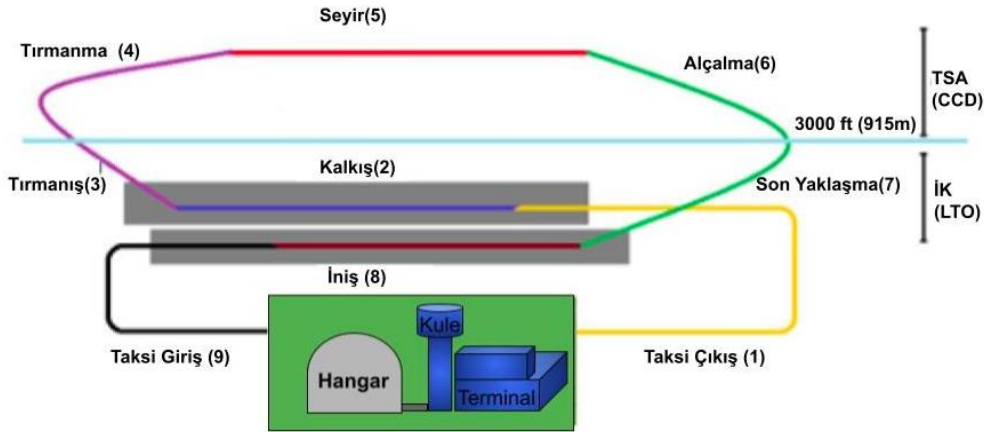
Gerçek Yanma;



LTO döngüsü içinde emisyonları, dört operasyon modundan kaynaklanan emisyonlar olarak kabul ederiz. Bunlar; Yaklaşma, Taksi, kalkış, 3000 ft (~1915 m) yüksekliğe tırmanma şeklindedir [43]. Şekil 1 'de gösterildiği gibi, Tipik bir LTO ve CCD döngüsü birkaç uçuş aşamasını içerir. Bunlar aşağıda verilmiştir.

- Taksi çıkışı (1)
- Kalkış (2)
- Tırmanış Başlangıcı (Çıkışı) (3)
- Tırmanış (4)
- Seyir (5)
- Alçalma (6)
- Son yaklaşım (7)
- İniş (8)
- Taksi girişi (9)

Bu aşamalar tipik bir uçuşun genel özeti olmaktadır [44].



Şekil 1. Tipik bir LTO ve CCD döngüsü [43]

Uçuş için gerçekleşen faaliyetler, "uçuş hareketi" bir uçak taksi yapmaya başladığı anda başlar ve uçak taksiyi sonlandırdığı anda sona erer. Havaçılıktan kaynaklanan egzoz emisyonları yakıtın yanmasından kaynaklanır. Uçuş hareketleriyle ilgili tüm faaliyetler sırasında ortaya çıkarlar. Şekil 2'de gösterildiği ve aşağıda listelendiği gibi faaliyet grupları halinde gruplandırılabilirler:



Şekil 2. Uçuş Hareketleri ile İlgili Faaliyetler

Yukarıda listelenen uçuş hareketleriyle ilgili faaliyetlerden, küresel yakıt kullanımı ve emisyon envanterlerinin mümkün olduğu üç ana faaliyet şunlardır:

- Kalkış Faaliyetleri
- CCD Faaliyetleri
- Varış Etkinlikleri [44].

Uçaklardan kaynaklanan egzoz emisyonlarını hesaplama yöntemleri, IPCC tarafından üç farklı (Tier 1, Tier 2 ve Tier 3) yaklaşım olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada Tier 2 yöntemi ile uçak tiplerine göre LTO döngülerini kullanarak emisyonları hesaplanmaktadır. Hesaplama yönetmelerinde kullanacağımız kalkış evresinde üç mod vardır. Bunlar sırasıyla; taksi çıkış, kalkış ve tırmanmadır. İniş evresinde yine üç mod vardır. Bunlar; son yaklaşma, iniş ve taksi giriştir. Her modda motor gücü farklıdır. Hesaplamalarda bu önem arz eder. Hesaplamaya dahil olmayan evre düz uçuş evresidir yine o da üç moda sahiptir. Bu modlar tırmanış, seyir ve alçalmadır. Uçuş bilgileri DHMİ genel müdürlüğünden alınmıştır [45]. Emisyon salınımı değerlerini hesaplamak için ICAO'dan [43] uçuş faz süreleri ve Motor Veri Bankasından uçuş faz yakıt debisi, uçuş faz emisyon indeksleri ve uçuş faz itki değerleri alınarak aşağıdaki denklemde kullanılmıştır [46,47,48].

$$E_{i,m} = \sum_a \sum_e n_a \cdot l_{a,e} \cdot F_{a,e,m} \cdot E_{m,e,i} \cdot t_{m,a} \quad (1)$$

Buradaki denklemde,

$E_{i,m}$: Yıllık Hava Kirliliği Emisyonu [gr/y]
n_a	: Uçak Sayısı
$l_{a,e}$: Uçak Modelinin Yıllık Sayısı
$F_{a,e,m}$: Yakıt Debisi [kg/sn]
$E_{m,e,i}$: Emisyon İndeksi [gr/kg yakıt]
$t_{m,a}$: Uçak Tipi İçin Faz Süresi [sn]

Olarak tanımlanır.

Tablo 1'te uçuş fazları, uçuş faz süreleri ve itki değerleri görülmektedir.

Tablo 1. Eklenecek tablo [3].

Evre	Uçuş Fazı	Motor Modu	İtki Ayarı	Harcanan Süre	
				(Saniye)	(Dakika)
Kalkış	Taksi Çıkış (1)	Rölanti	%7 F_{00}	1140	19
	Kalkış (2)	Kalkış	%100 F_{00}	42	0.7
	Tırmanış (3)	Tırmanış	%85 F_{00}	132	2.20
İniş	Son Yaklaşma (7)	Yaklaşma	%30 F_{00}	200	3.4
	İniş (8)	Yaklaşma	%30 F_{00}	40	0.6
	Taksi Giriş (9)	Rölanti	%7 F_{00}	420	7

LTO döngüleri için uçak tipleri ve emisyon değerlerinin yanı sıra uçak tipi başına kg/LTO cinsinden yakıt tüketimi örnekleri (ICAO varsayılan LTO süresi: 32 dakika 54 saniye) Tablo 2'de verilmiştir [44].

Tablo 2. LTO Döngüleri İçin Uçak Tipleri ve Emisyon Değerlerinin Yanı Sıra Uçak Tipi Başına Kg/LTO Cinsinden Yakıt Tüketimi [41].

Uçak Tipi	Motor Adı	Yakıt Yanması (Kg)	CO ₂ (Kg)	NO _x (Kg)	SO _x (Kg)	H ₂ O (Kg)	CO (Kg)	HC (Kg)	PM Toplam (Kg)
A320	3CM026	816,17	2570,93	11,28	0,69	1003,89	8,25	1,64	0,07
B737-800	8CM051	881,1	2775,47	12,3	0,74	1083,75	7,07	0,72	0,07

B737 ve A320 tip uçaklar için Muğla ili LTO değerleri Gerçek zamanlı iniş kalkış süreleri ICAO 1995 tarihli değerlerinden farklıdır ve aşağıda verilmiştir [49]. Burada görüldüğü üzere ICAO LTO döngüsünü 32 dk 54 sn kabul edilse de gerçek zaman ortalama olarak daha düşük süredir. Bu da emisyonların yayılma miktarı açısından önemlidir. Tablo3'te gerçek zamanlı LTO döngüsü sürelerini vermektedir. ICAO'nun süreleri ortalama sürelerdir ve havalimanından havalimanına farklılık göstermemektedir.

Tablo 3. B737-800 ve A320 Tip Uçaklar İçin Gerçek Zamanlı Uçuş Fazları, Uçuş Faz Süreleri [49].

Havaalanı	Taxi-in (dk)	Taxi-out (dk)	Kalkış (dk)	Yaklaşma (dk)	Tırmanma (dk)	LTO Toplam (dk)
Dalaman DLM	4,2	8,0	0,5	5,4	1,1	19,2
Milas- Bodrum BJV	5,2	6,9	0,5	3,4	1,0	17,0

2.2. B737 Ailesi ve A320 Ailesi Verileri

Boeing, Amerikan menşeli bir uçak üreticisidir. Dünyada en yaygın kullanılan yolcu uçağı aile ailesinden birisi de B737 ailesidir. B737, ilk kez 9 Nisan 1967'de uçuş yapan ve 10 Şubat 1968'de Lufthansa'da hizmete giren tek koridorlu, dar gövdeli bir uçaktır [50]. Diğer üretici Avrupalı Airbus ise yine en yaygın kullanılan A320 ailesini üreterek boeing'in pazarına ortak olmaktadır [51]. Aşağıda bu iki uçak ailesinin fertlerinden olan B737-800 ve A320 uçaklarına ait motor verileri talo4'te, sipariş verileri ise Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4. Uçak Tiplerine Ait Motor Bilgileri

ICAO Kodu	Uçak Adı	Motor Sayısı	Motor Tipi	Yaygın Kullanılan Motor Modelleri
B738	Boeing 737-800	2	Turbojet	CFM56-7B26, CFM56-7B22, CFM56-7B27
A320	Airbus A-320	2	Turbojet	CFM56-5B4/P, V2527-A5

Yukarıda görüldüğü üzere her iki tip yolcu uçağı farklı motor tipleri kullanmaktadır. Bunun nedenlerinden biri operatörlerinin tercihine göre motor tercihinin değişmesidir [50,51].

Tablo 5. Uçak Tiplerine Ait Motor Bilgileri

Uçak	Sipariş	Teslimatlar	Doldurulmayan Siparişler	İlk Uçuş
737-800	4.991	4.989	2	31 Temmuz 1997
A320	4.763	4.752	11	26 Şubat 1988

Tablo 5'e baktığımızda her iki uçak tipi birbirlerine yakın sipariş almışlardır. Türkiye'de faaliyet gösteren havayolları filolarında bulunan B737-800 ve A320 uçaklarının sayıları tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Türk şirketlerinde B737-800 ve A320 uçak sayıları

Şirket	737-800	A320
THY	85	18
Pegasus	17	54
Anadolujet	45	10
SunExpress	62	-
Corendon	14	-
Freebirth	-	10
MGA Havayolları	3	-
Toplam	226	92

Türkiye'de tescilli yolcu uçağı sayısı Ağustos 2023 yılı itibarıyla 638 adettir. Türk tescilli B737-800 ve A320 uçaklarının sayısı 318 adettir. Bu sayı toplam tescilli uçakların neredeyse %50'sine karşılık gelmektedir [45].

2.3. Havalimanları ve Uçuş Verileri

Muğla ili içerisinde iki adet uluslararası tarifeli ve tarifersiz uçuş yapılabilen havalimanı bulunmaktadır. Bunlardan biri Dalaman havalimanıdır diğeri ise Milas-Bodrum havalimanıdır. Aşağıda haritada konumları verilmiştir.



Şekil 3. Havalimanlarının haritada gösterimi [45]

2.3.1. Dalaman Havaalanı İçin Hava Trafiği Verileri

Dalaman Havalimanı (IATA: DLM, ICAO: LTBS) Muğla'nın Dalaman ilçesi sınırları içerisinde bulunan sivil, askeri amaçla kullanılan uluslararası havalimanıdır. Şehir merkezinin 6 km güneyinde yer alan havalimanı Muğla'ya hizmet veren iki uluslararası havalimanından biridir. Koordinatları 36° 42' 52"N 28° 47' 33" E ve rakım yaklaşık 6.15 m'dir. Dalaman Havalimanı 57 havaaracı park kapasiteli, 3000x45m ölçülerinde beton pisti olan ve CAT I (Kategori I) niteliklerine sahiptir. 2015-2022 yıllarına ait yolcu ve uçak trafiği verileri aşağıdaki gibidir.

Tablo 7. Dalaman Havalimanı Yolcu Trafiği Verileri (2015-2022)

Yıl	İç Hat	Dış Hat	Toplam
2015	1.229.318	3.152.765	4.382.083
2016	1.279.611	1.822.291	3.101.902
2017	1.461.033	2.257.735	3.718.768
2018	1.615.590	2.935.900	4.551.490
2019	1.583.089	3.321.930	4.905.019
2020	756.473	830.652	1.587.125
2021	1.393.116	930.758	2.323.874
2022	1.520.015	3.015.585	4.535.600

Tablo 7'ye bakıldığında trafiğin en yoğun olduğu yıl covid-19 Pandemisi öncesi 2019 yılıdır. 2022 yılında bile havacılık pandemi öncesi değerlere ulaşamamıştır.

Tablo 8. Dalaman Havaalanı Uçuş Trafiği Verileri (adet/yıl)

Tip	2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021	
	İç Hatlar	Dış Hatlar	İç Hatlar	Dış Hatlar	İç Hatlar	Dış Hatlar	İç Hatlar	Dış Hatlar	İç Hatlar	Dış Hatlar	İç Hatlar	Dış Hatlar	İç Hatlar	Dış Hatlar
B738	6.170	6.358	6.653	3.973	5.594	3.617	4.960	5.413	5.292	6.999	3.107	2.486	6.497	2.978
%'lik pay	67,74	35,42	69,94	35,31	56,67	28,64	46,49	32,87	51,09	38,73	51,58	46,03	61,96	54,56
A320	1.526	3.582	1.167	3.108	1.843	2.480	2.012	3.241	1.503	2.698	854	850	1.604	593
%'lik pay	16,75	19,95	12,27	27,62	18,67	19,64	18,86	19,68	14,51	14,93	14,18	15,74	15,30	10,86
Diğer	1.413	8.012	1.693	4.171	2.435	6.531	3.697	7.815	3.564	8.374	2.063	2.065	2.385	1.887
%'lik pay	15,51	44,63	17,80	37,07	24,67	51,72	34,65	47,45	34,40	46,34	34,25	38,23	22,74	34,57

Tablo 8'e baktığımızda 2016 yılında dalaman havalimanına yapılan her üç iç hat uçuşundan iki B737-800 uçağıyla yapılmıştır. A320 uçağının payı 12,27 iken diğer tüm uçak tiplerinin payı yaklaşık %17,8'de kalmıştır. 2021 yılında Boeing 737-800 dış hatlar uçuşlarının yarısından fazlasında kullanılmıştır. A320 kullanımı 2018 de iç hatlarda %18,86 iken dış hatlarda en fazla 2016 yılında %27,62 oranında kullanılmıştır.

2.3.2. Milas-Bodrum Havaalanı İçin Hava Trafiği Verileri

Milas-Bodrum Havalimanı (IATA: BJV, ICAO: LTFE) Muğla'nın Milas ilçesi sınırları içerisinde bulunan sivil amaçla kullanılan uluslararası havalimanıdır. Bodrum'a 32 km, Milas'a 12 km, Muğla'ya 76 km yer alan havalimanı

Muğla'ya hizmet veren iki uluslararası havalimanından biridir. Koordinatları 37°15'02''K 27°39'51''D ve rakım yaklaşık 6 m'dir.

Tablo 9. Milas-Bodrum Havaalanı Yolcu Trafiki Verileri (2015-2021)

Yıl	İç Hat	Dış Hat	Toplam
2015	2.309.115	1.568.758	3.877.873
2016	2.312.042	909.734	3.221.776
2017	2.576.262	925.268	3.501.530
2018	2.670.185	1.505.927	4.176.112
2019	2.464.398	1.873.335	4.337.733
2020	1.010.734	469.605	1.480.339
2021	1.908.796	1.000.541	2.909.337
2022	2.045.632	1.852.895	3.898.527

Tablo 9'a bakıldığında trafiğin en yoğun olduğu yıl covid-19 Pandemisi öncesi 2019 yılıdır. 2022 yılında bile havacılık pandemi öncesi değerlere ulaşamamış ve 2016 değerlerine ancak ulaşmıştır.

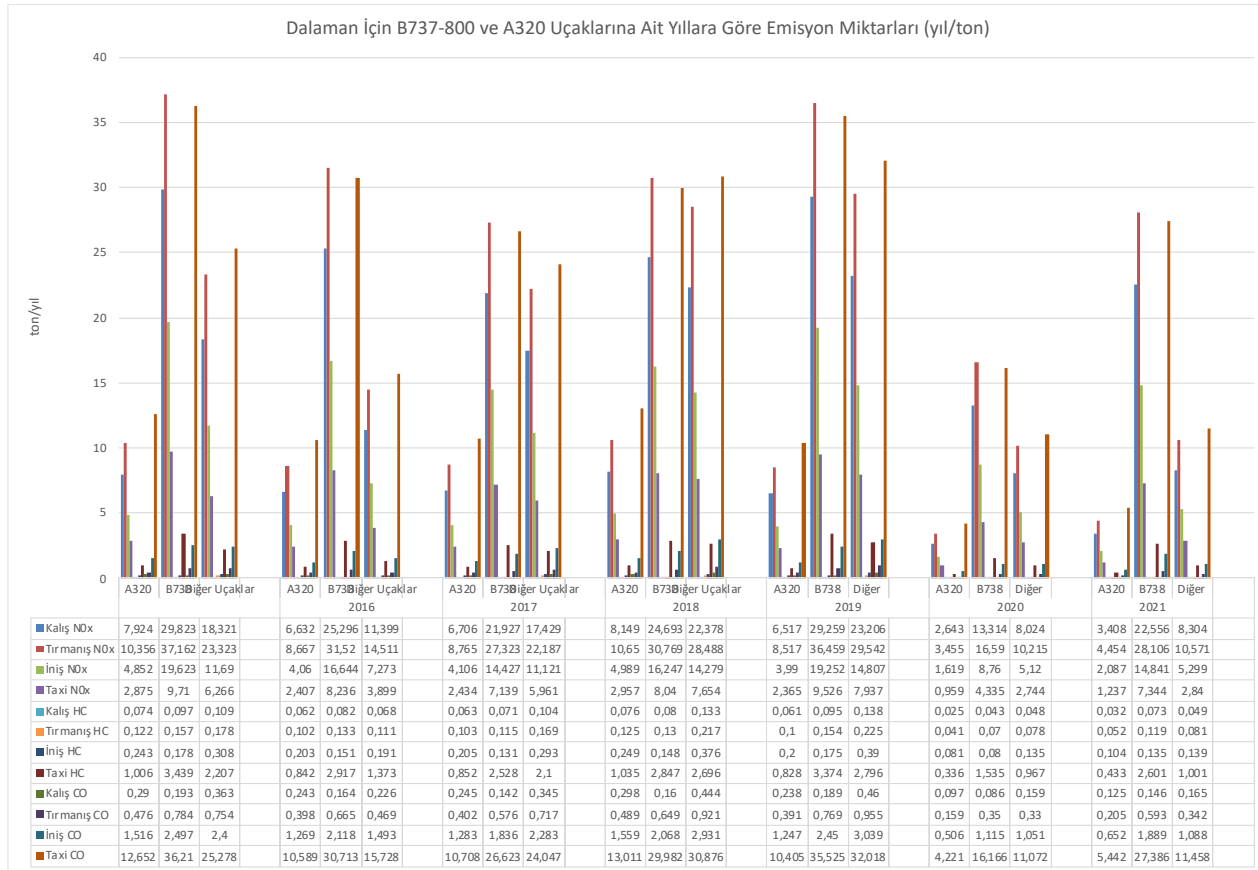
Tablo 10. Milas Bodrum Havaalanı Uçuş Trafiki Verileri (2015-2021)

Tip	2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021	
	İç Hatlar	Dış Hatlar	İç Hatlar	Dış Hatlar	İç Hatlar	Dış Hatlar	İç Hatlar	Dış Hatlar	İç Hatlar	Dış Hatlar	İç Hatlar	Dış Hatlar	İç Hatlar	Dış Hatlar
B738	10179	4166	9838	2929	9467	2566	9039	3566	9431	4697	4232	1125	6.497	3.319
%'lik pay	62,17	42,04	60,23	45,07	56,22	42,41	51,51	38,00	57,23	42,67	55,64	40,12	48,09	49,75
A320	2452	2528	2333	1960	3565	1471	3531	2368	2693	3198	1034	400	1.604	886
%'lik pay	14,97	25,51	14,28	30,16	21,17	24,31	20,12	25,23	16,34	29,05	13,59	14,27	11,87	13,28
Diğer	3.743	3.216	4.162	1.610	3.807	2.014	4.978	3.450	4.354	3.113	2.340	1.279	5.409	2.467
%'lik pay	22,86	32,45	25,48	24,77	22,61	33,28	28,37	36,76	26,42	28,28	30,77	45,61	40,04	36,98

Tablo 10'a baktığımızda 2016 yılında Milas Bodrum havalimanına yapılan uçuşların %60' ı B737-800 uçağıyla yapılmıştır. A320 uçağının payı 14.28 iken diğer tüm uçak tiplerinin payı yaklaşık %25,48'de kalmıştır. 2021 yılında Boeing 737-800 dış hatlar uçuşlarının yarısından fazlasında kullanılmıştır. A320 kullanımı 2018 de iç hatlarda %20,12 iken dış hatlarda en fazla 2016 yılında %25,23 oranında kullanılmıştır.

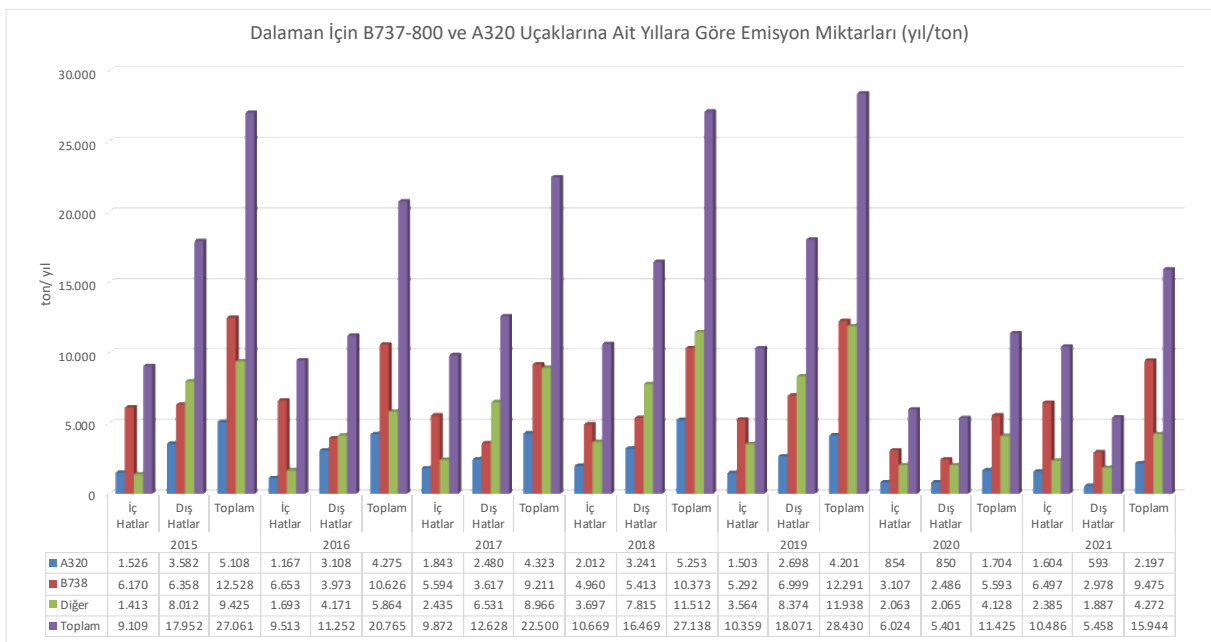
3. Bulgular

3.1. Dalaman Havaalanı İçin Emisyon Değerleri



Şekil 4: Dalaman Havalimanı için 2015-2022 Yılları Arasında Emisyon Gazlarının Salınım Miktarı

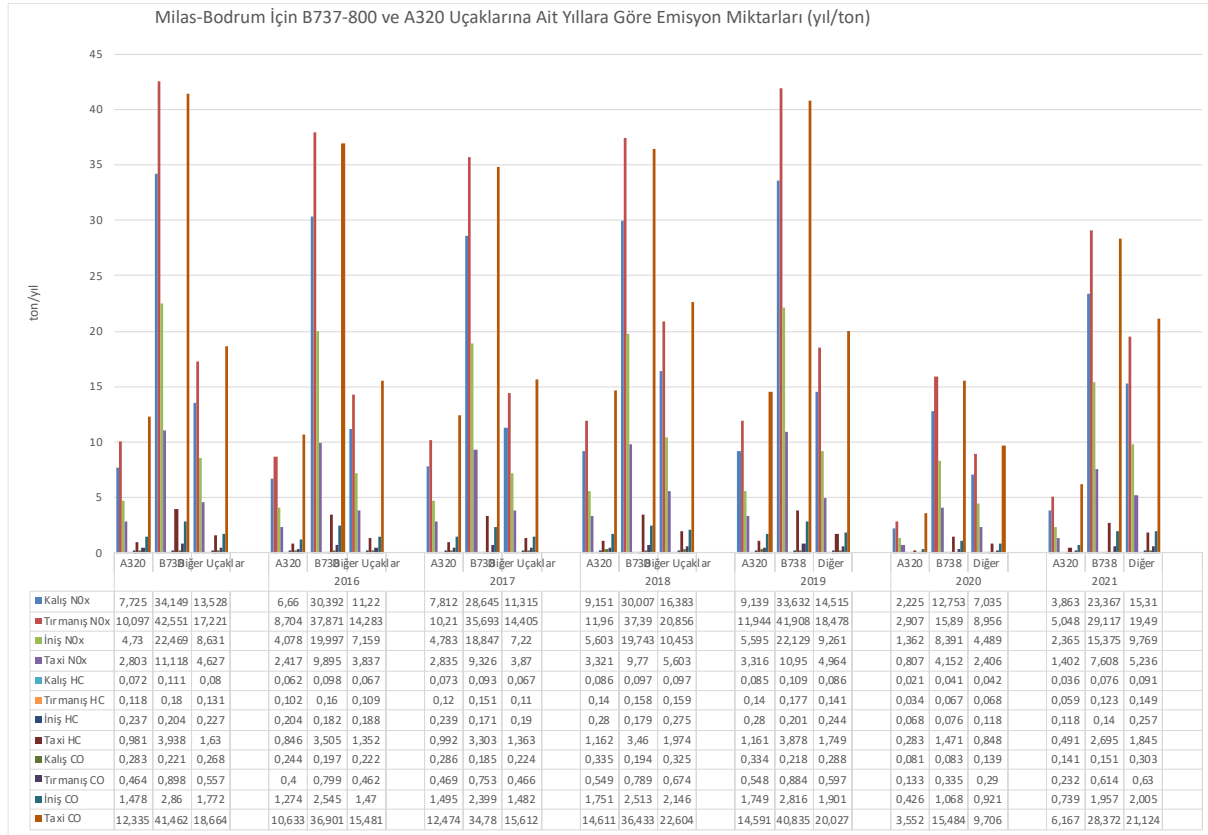
Uçuş fazları arasında en fazla NOx salınımı tırmanış fazında olmaktadır. Tırmanış fazında B737-800 uçağı en fazla NOx emisyonu 2015 yılında 37,162 ton/y, en az ise 2020 yılında 16,59 ton/y olarak hesaplanmıştır. A320 uçağı ise kalkış fazında 2018 yılında 10,356 ton/y, 2020 yılında 3,455 ton/y'dir. CO emisyonu en fazla taksi fazında gerçekleşmiştir. Taksi fazında B737-800 uçağı en fazla CO emisyonu 2016 yılında 36,21 ton/y, en az ise 2020 yılında 16,166 ton/y olarak hesaplanmıştır. A320 uçağı ise kalkış fazında 2018 yılında 13,011 ton/y, 2020 yılında 2,21 ton/y'dir. Her uçak tipi için HC emisyonu en fazla taksi fazında salınmaktadır. Taksi fazında B737-800 uçağı en fazla HC emisyonu 2015 yılında 3,439 ton/y, en az ise 2020 yılında 1,535 ton/y olarak hesaplanmıştır. A320 uçağı ise kalkış fazında 2018 yılında 1,035 ton/y, 2020 yılında 0,336 ton/y'dir.



Şekil 5: Dalaman Havalimanı için 2015-2022 Yılları Arasında Toplam Salınım Emisyon Miktarı

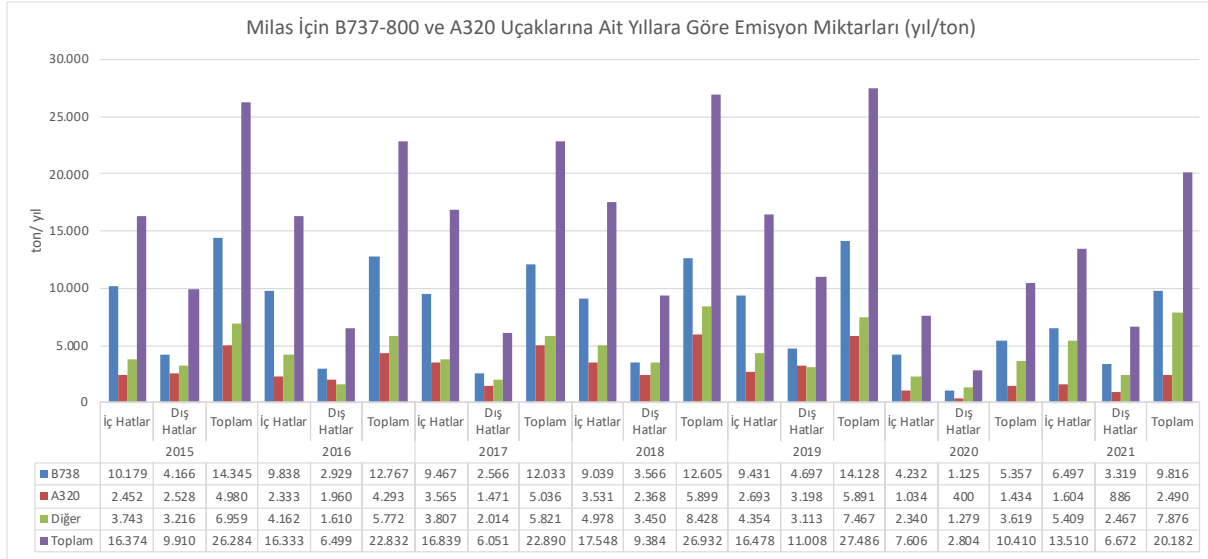
Toplam salınan emisyonlara baktığımızda 2019 senesinde 28,430 ton/y emisyon salınmıştır. En az emisyon ise 2020 yılında 11,425 ton/y. İç hatlarda en fazla 10,669 ton/y, en az salınım ise 2020 yılında 6,024 to/y. Dış hatlarda en fazla salınım 2019 yılında 18,071 ton/y, en az salınım ise 5,401 ton/y'dır.

3.2. Milas-Bodrum Dalaman Havaalanı İçin Emisyon Değerleri



Şekil 6. Milas Bodrum Havalimanı için 2015-2022 Yılları Arasında Emisyon Gazlarının Salınım Miktarı

Uçuş fazları arasında en fazla NOx salınımı tırmanış fazında olmaktadır. Tırmanış fazında B737-800 uçağı en fazla NOx emisyonu 2015 yılında 45,551 ton/y, en az ise 2020 yılında 15,89 ton/y olarak hesaplanmıştır. A320 uçağı ise kalkış fazında 2018 yılında 11,96 ton/y, 2020 yılında 3,455 ton/y'dır. CO emisyonu en fazla taksi fazında gerçekleşmiştir. Taksi fazında B737-800 uçağı en fazla CO emisyonu 2015 yılında 41.462 ton/y, en az ise 2020 yılında 165,484 ton/y olarak hesaplanmıştır. A320 uçağı ise kalkış fazında 2018 yılında 14,591 ton/y, 2020 yılında 3,552 ton/y'dır. Her uçak tipi için HC emisyonu en fazla taksi fazında salınmaktadır. Taksi fazında B737-800 uçağı en fazla HC emisyonu 2015 yılında 3,938 ton/y, en az ise 2020 yılında 1,471 ton/y olarak hesaplanmıştır. A320 uçağı ise kalkış fazında 2018 yılında 1,162 ton/y, 2020 yılında 0,283 ton/y'dır.



Şekil 7. Milas Bodrum Havalimanı için 2015-2022 Yılları Arasında Toplam Salınan Emisyon Miktarı

Toplam salınan emisyonlara baktığımızda 2019 senesinde 27,486 ton/y emisyon salınmıştır. En az emisyon ise 2020 yılında 10,410 ton/y. İç hatlarda en fazla 2018 senesi için 17,548 ton/y, en az salınım ise 2020 yılında 7,606 ton/y. Dış hatlarda en fazla salınım 2019 yılında 11,008 ton/y, en az salınım ise 2,804 ton/y'dir.

4. Sonuçlar

Bu araştırma, Dalaman ve Milas-Bodrum havalimanlarındaki B737-800 ve A320 uçaklarının 2015-2021 yılları arasındaki iniş-kalkış verilerini temel alarak NO_x, CO ve HC emisyonlarını incelemiştir. NO_x emisyonlarının tırmanış fazında, CO emisyonlarının taksi fazında yoğunlaştığı ve HC emisyonlarının özellikle taksi fazında belirgin bir şekilde arttığı belirlenmiştir. 2019 yılında en yüksek emisyon seviyelerine ulaşılmış, ancak 2020'de (Covid-19 sebebiyle uçuşların durdurulmasından kaynaklanan) belirgin bir azalma gözlenmiştir.

NO_x Emisyonları bakımından, Dalaman Havalimanı'nda B737-800 uçağı tırmanış fazında 2015 yılında 37,162 ton/y NO_x emisyonu salarken, 2020 yılında bu değer 16,59 ton/y'e düşmüştür. Milas-Bodrum Havalimanı'nda ise A320 uçağı kalkış fazında 2018 yılında 11,96 ton/y NO_x emisyonu salarken, 2020 yılında bu miktar 3,455 ton/y olarak hesaplanmıştır. Tırmanış fazında yüksek NO_x emisyonları, motorun tam güçte çalışması ve zengin yakıt hava karışımından kaynaklanmaktadır.

CO Emisyonları bakımından, Dalaman Havalimanı'nda B737-800 uçağı taksi fazında 2016 yılında 36,21 ton/y CO emisyonu salarken, 2020 yılında bu değer 16,166 ton/y'e azalmıştır. Milas-Bodrum Havalimanı'nda ise A320 uçağı kalkış fazında 2018 yılında 14,591 ton/y CO emisyonu salarken, 2020 yılında 3,552 ton/y CO emisyonu kaydedilmiştir. En yüksek CO emisyonları taksi fazında gözlemlenmiştir.

HC Emisyonları bakımından, Dalaman Havalimanı'nda B737-800 uçağı taksi fazında 2015 yılında 3,439 ton/y HC emisyonu salarken, 2020 yılında bu değer 1,535 ton/y'e azalmıştır. Milas-Bodrum Havalimanı'nda ise A320 uçağı kalkış fazında 2018 yılında 1,162 ton/y HC emisyonu salarken, 2020 yılında 0,283 ton/y HC emisyonu kaydedilmiştir. HC emisyonları, özellikle taksi fazında daha yüksek ölçülmüştür.

Toplam Emisyonlar bakımından, her iki havalimanında 2019 yılında en yüksek toplam emisyon seviyelerine ulaşılmış, ancak 2020 yılında belirgin bir azalma gözlenmiştir. Dalaman Havalimanı'nda iç hatlarda en fazla emisyon 2018 yılında 17,548 ton/y, Milas-Bodrum Havalimanı'nda ise 2019 yılında 11,008 ton/y olarak kaydedilmiştir. En az emisyonlar her iki havalimanı için de 2020 yılında gözlenmiştir.

Bu sonuçlar, havaalanlarının emisyonlarının çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebileceğini ve havacılık sektörünün çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir rol oynadığını vurgulamaktadır. Havaalanları ve havayolu şirketleri, çevre dostu uçuş operasyonlarını teşvik ederek emisyonları azaltma konusunda daha fazla çaba harcamalıdır. Gerçek zamanlı verilerin kullanılması, diğer havalimanları için yapılan hesaplamalarda daha doğru ve etkili bir yönlendirme sağlayabilir. Bu nedenle, gerçek verilere dayalı stratejilerin benimsenmesi, çevresel etkileri en aza indirme çabalarında daha etkili olabilir.

Kaynakça

- [1] Volkan Yavaş, Ayla Özhan Dedeoğlu, Hava Taşımacılığında Değişen İş Modelleri, Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulama Dergisi Cilt:4 – Sayı:2, pp: 120-133, Doi: 10.51513/jitsa.957540
- [2] ICAO (2021). Future of Aviation, (Erişim tarihi:08.10.2023 <https://www.icao.int/Meetings/FutureOfAviation/Pages/default.aspx>,
- [3] Linz, M. (2012). "Journal Of Air Transport Management Scenarios For The Aviation İndustry : A Delphi-Based Analysis For 2025". Journal Of Air Transport Management, 22, 28– 35.
- [4] Spicer, C.W., Holdren, M.W., Cowen, K.A., Joseph, D.W., Satola, J., Goodwin, B., Mayfield, H., Laskin, A., Alexander, M.L., Ortega, J.V., Newburn, M., Kagann, R., Hashmonay, R., Rapid measurement of emissions from military aircraft turbine engines by downstream extractive sampling of aircraft on the ground: Results for C130 and F-15 aircraft, Atmospheric Environment, 43, 2612-2622, 2009.
- [5] Schumann U. Effects of aircraft emissions on ozone, cirrus clouds, and environmental climate. Air Space Eur 2000;2(3): 29–33.
- [6] Bernsten TK, et al. Sources of NOx at cruise altitudes: implications for predictions of ozone and methane perturbations due to NOx from aircraft. In: Sausen R, Fichter C, Amanatidis G, editors. Proceedings of an international conference on European conference on aviation, atmosphere and climate (AAC), Friedrichshafen, Germany, 30 June to 3 July 2003, 2003. p. 190–6.
- [7] Baugchum SL, Plumb IC, Vohralik PF. Stratospheric ozone sensitivity to aircraft cruise altitudes and NOx emissions. In: Sausen R, Fichter C, Amanatidis G, editors. Proceedings of an international conference on European conference on aviation, atmosphere and climate (AAC), Friedrichshafen, Germany, 30 June to 3 July 2003, 2003. p. 145–50.
- [8] Keskin Uğur (2006), Aircraft Emissions at Turkish Airports, Energy, (31) 372–384, doi:10.1016/j.energy.2005.01.012
- [9] Schäfer, K., Jahn, C., Sturm, P., Lechner, B. ve Bacher, M. (2003). Aircraft emission measurements by remote sensing methodologies at airports. Atmospheric Environment, 37(37), 5261-5271.
- [10] Eyers, C., Addleton, D., Atkinson, K., Broomhead, M., Christou, R., Elliff, T. Ve Stanciou, T. (2005). AERO2k Global Aviation Emissions Inventories for 2002 and 2025 QINETIQ. Farnborough, Hants, UK.
- [11] Fleuti, E. ve Polymeris, J. (2004). Aircraft nox-emissions within the operational lto cycle. Unique (Flughafen Zrich AG) and Swiss Flight Data Services.
- [12] Schürmann, G., Schäfer, K., Jahn, C., Hoffmann, H., Bauerfeind, M., Fleuti, E. Ve Rappenglück, B. (2007). The impact of NOx, CO and VOC emissions on the air quality of Zurich airport. Atmospheric Environment, 41(1), 103-118.
- [13] Elbir, T. (2008). Estimation of engine emissions from commercial aircraft at a midsized Turkish airport. Journal of Environmental Engineering,, 134(3), 210-215.
- [14] Gökçe, M. ve Bekdemir, S. (2006). Türkiye'de Hava Trafığı Yoğun Havalimanlarında Uçak İniş-Kalkış Süreçlerinde Oluşan NOx Miktarlarının Belirlenmesi. Kayseri VI. Havacılık Sempozyumu, (s. 555-559). Nevşehir.
- [15] Unal, A. H. (2005). Airport related emissions and impacts on air quality: Application to the Atlanta International Airport. Atmospheric Environment, 39(32), 5787-5798.
- [16] Carslaw, D. C. (2008). Near-field commercial aircraft contribution to nitrogen oxides by engine, aircraft type, and airline by individual plume sampling. Environmental science & technology,, 42(6), 1871-1876.
- [17] Winther, M. K. (2006). Calculation of odour emissions from aircraft engines at Copenhagen Airport. Science of the total environment,, 366(1), 218-232.
- [18] Steib, R. L. (2008). Airport (Budapest Ferihegy–Hungary) air quality analysis using the EDMS modeling system. Part I. Model development and testing. Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service, 112(2), 99-112.
- [19] Nikoleris, T. G. (2011). Detailed estimation of fuel consumption and emissions during aircraft taxi operations at Dallas/Fort Worth International Airport. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 16(4), 302-308.
- [20] Çağatan, K. (2011). İstanbul Atatürk Havalimanı İçin Uçak Emisyonlarının Belirlenmesi ve Çevresel Etkileri/Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [21] Öztürk O. (2011). Kayseri Erkilet Havalimanındaki Uçak Emisyonlarının Belirlenmesi/Yüksek Lisans Tezi. Kayseri: Erciyes Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [22] Altuntaş, Ö. (2011). Investigation of the environmental concern in aircraft selection for domestic flights in some Turkish airports. Journal of Aeronautics and Space Technologies, 5(1), 11-18.
- [23] İlbaş, M. (2012). Experimental analysis of the effects of hydrogen addition on methane combustion. International journal of energy research, 36(5), 643-647.
- [24] Çizmecioğlu, M. (2013). Türkiye'de Sivil Havacılık ve Hava Yolu Ulaşımı Üzerine Bir Araştırma (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [25] Ünal, İ. T. (2014). Nevşehir Kapadokya Havalimanının Emisyon Ve Gürültü Açısından Değerlendirilmesi. Mühendis ve Makine, 654.
- [26] Canarlanlar, A. O. (2015). Hava Trafik Yönetiminin Uçaklarda Yakıt Tüketimi Ve Emisyona Olan Etkilerinin Gerçek Uçuş Verilerine Dayalı Analizi Ve Bir Model Önerisi/Doktora Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [27] Babaoğlu, N. Ö. (2017). Kahramanmaraş Havalimanı İçin Uçaklardan Kaynaklanan Emisyonların Belirlenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(3), 24-30.
- [28] Şekertekin, Y. (2017). Türkiye İç Hat Uçuşlarından Kaynaklanan Emisyonların Belirlenmesi/Yüksek Lisans Tezi. Zonguldak: Bülent Ecevit Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [29] İlker Yılmaz. (2017). Emissions from passenger aircraft at Kayseri Airport, Turkey. Journal of Air Transport Management 58 (2017) 176-182, <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.11.001>
- [30] Kuzu, S. L. (2018). Estimation and dispersion modeling of landing and take-off (LTO) cycle emissions from Atatürk International Airport. Air Quality, Atmosphere & Health, 11(2), 153-161.
- [31] Kumaş, K., İnan, O., Akyüz, A., & Güngör, A. (2019). Muğla Dalaman Havalimanı Uçaklardan Kaynaklanan Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 7(2), 291-297.
- [32] Ekici, S. & Şöhret, Y. (2020). Environmental Impact And Cost Assessment Of Commercial Flight Induced Exhaust Emissions At Isparta Süleyman Demirel Airport. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8 (2), 597-604. DOI: 10.21923/jesd.709428
- [33] Keskin, B. N., & Ercoşkun, Ö. Y. (2021). Covid-19'un havacılık sektörüne çevresel etkisi: Adnan Menderes Havalimanı örneği. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 4(1), 74-86.
- [34] Ramazan GENÇ (2022), Malatya Erhaç Havalimanı İçin Uçak Emisyonlarının Belirlenmesi Ve Çevreye Etkileri, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [35] Öz, E. & Yalçın Ercoşkun, Ö. (2022). Covid-19 Pandemisinin Esenboğa Havalimanı hava trafiğine ve uçak emisyonlarına etkisi. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 5 (1), 45-59. DOI: 10.51513/jitsa.1069097
- [36] Yıldız, M. (2021). Electric Energy Use in Aviation, Perspective and Applications. Politeknik Dergisi, 24 (4), 1605-1610. DOI: 10.2339/politeknik.852272
- [37] Yildiz, M., Kale, U. and Nagy, A. (2022), "Analyzing well-to-pump emissions of electric and conventional jet fuel for aircraft propulsion", Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 94 No. 10, pp. 1605-1613. <https://doi.org/10.1108/AEAT-02-2021-0032>
- [38] C.W. Spicer, M.W. Holdren, S.E. Miller, D.L. Smith, R.N. Smith, M.R. Kuhlman, D.P. Hughes, Aircraft Emissions Characterization: TF41-A2, TF30-P103, and TF30-P109 Engines, ESL-TR-87-27, U.S. Air Force, Engineering and Services Laboratory, Tyndall Air Force Base, FL (1987)
- [39] Environmental Protection Agency (EPA), Evaluation of air pollutant emissions from subsonic commercial jet aircraft, Final Report, report no. EPA A420-R-99-013, Michigan, USA: Engine Programs and Compliance Division, 1999, US Environmental Protection Agency, Ann Arbor, Michigan.
- [40] Dikra Prasad Bajgai, Kundan Lal Shrestha, Evaluation of aircraft emission at Tribhuvan international airport and its contribution to air quality in Kathmandu, Nepal, Atmospheric Environment: X, Volume 17, 2023, 100204, ISSN 2590-1621, <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2023.100204>.
- [41] Feng Cao, Tie-Qiao Tang, Yunqi Gao, Feng You, Jian Zhang, Calculation and analysis of new taxiing methods on aircraft fuel consumption and pollutant emissions, Energy, Volume 277, 2023, 127618, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127618>.
- [42] Wuebbles, D., Gupta, M. and Ko, M., 2007, 'Evaluating the impacts of aviation on climate change', EOS Transactions of the American Geophysical Union, (88) 157-168.]
- [43] ICAO International Standards And Recommended Practices- Annex 16 To The Convention On International Civil Aviation: Environmental Protection II- Aircraft Engine Emissions (Fourth Ed.), QC, Montreal (2017) Volume, Canada 552
- [44] ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank. ICAO-9646-AN/943, International Civil Aviation Organization. Montreal, Canada, 1st ed., 1995
- [45] State Airports Authority (DHMI), Annual Statistics for 2021 (Istatistik Yilligi 2021); 2022, Istanbul: Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü, Yesilköy, Istanbul (in Turkish).
- [46] Perl A, Patterson J, Perez M. Pricing aircraft emissions at Lyon-Satolas airport. Transport Res Part D 1997;2(2):89-105.
- [47] Stefanou P, Haralambopoulos D. Energy demand and environmental pressures due to the operation of olympic airways in Greece. Energy 1998;23(2):125-36.
- [48] Kalivoda MT, Kudrna M. Methodologies for estimating emissions from air traffic: future emissions, COST 319 ACTION, report no. MEET Project ST-96-SC.204, Vienna, Austria; 1997, Perchtoldsdorf-Vienna.
- [49] Ali Ozan CANARSLANLAR. Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi (2017), C2-S1, 38-47, DOI: 10.23890/SUHAD.2017.0105
- [50] <https://www.boeing.com/commercial/#/orders-deliveries> ,2023, Erişim tarihi: 01.10.2023

[51] First half-year 2023 Financial Report, Airbus SE Unaudited Condensed Interim IFRS Consolidated Financial Information for the six-month period ended 30 June 2023

Fuzzy Logic Based Low Cost Mobile Alert System for Asthma and COPD Patients

Mustafa YURDAKUL^{*1}, Şakir TAŞDEMİR², Sümeyra Büşra ŞENGÜL³

^{*1}Kırıkkale University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Computer Engineering, KIRIKKALE

²Selçuk University, Faculty of Technology, Computer Engineering, KONYA

³Selçuk University, Faculty of Technology, Computer Engineering, KONYA

(Alınış / Received: 30.01.2024, Kabul / Accepted: 21.03.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

Keywords

Asthma,
Fuzzy Logic,
Air Quality,
COPD,
Alert System

Abstract: Respiratory diseases are infections caused by microorganisms. The two most common respiratory diseases are Chronic Obstructive Pulmonary Disease (COPD) and Asthma. Although these diseases cannot be completely cured, their effects can be reduced with precautions. Patients should improve their indoor air quality and avoid exposure to occupational dust and chemicals. However, patients may not be aware of the air quality in their environment. Therefore, patients may face situations such as attacks, use of rescue drugs and emergency hospitalisation. In this study, a portable mobile air quality warning device was developed that can automatically measure indoor and outdoor dust concentration, air quality, humidity, temperature and carbon monoxide (CO) levels. In order to enhance the evaluation of the air quality index, a fuzzy logic approach was used. Additionally, the device transmits sensor data to a server via wifi. The mobile application allows for monitoring of measured values and provides audio and visual warnings in potentially dangerous situations for the patient.

Astım ve KOAH Hastaları için Bulanık Mantık Tabanlı Düşük Maliyetli Mobil Uyarı Sistemi

Anahtar Kelimeler

Astım,
Bulanık Mantık
Hava Kalitesi,
KOAH,
Uyarı Sistemi

Öz: Solunum yolu hastalıkları, mikroorganizmaların yol açtığı enfeksiyonlar olarak bilinir. Kronik Obstrüktif Akciğer Hastalığı (KOAH) ve Astım en yaygın solunum yolu hastalıklarıdır. Bu hastalıklar tamamen engellenemese de, bazı önlemlerle etkileri azaltılabilir. Hastaların buldukları ortamın hava kalitesini iyileştirmek ve mesleki toz ve kimyasallardan uzak durmak önemlidir. Fakat hastalar buldukları ortamın hava kalitesi bilgisine sahip değildir. Bu yüzden atak, kurtarıcı ilaç kullanımı ve acil olarak hastaneye başvuru gibi durumlarla karşı karşıya kalabilirler. Bu çalışmada, iç ve dış mekânın toz konsantrasyonunu, hava kalitesini, nemini, sıcaklığını ve karbon monoksit (CO) değerlerini otomatik olarak ölçebilen taşınabilir mobil destekli bir hava kalitesi uyarı cihazı geliştirildi. Cihazın hava kalitesi indeksini daha iyi değerlendirebilmesi için bulanık mantık yaklaşımı kullanıldı. Ayrıca, cihaz sensörlerden gelen verileri wifi aracılığıyla bir sunucuya iletmektedir. Böylece, ölçülen değerler ile takip edilebilmektedir ve hasta potansiyel olarak tehlikeli durumlarda sesli ve görsel etkileşimlerle uyarılmaktadır.

*İlgili Yazar, email: mustafayurdakul@kku.edu.tr

1. Introduction

Chronic respiratory diseases affect millions of people worldwide, resulting in approximately 4 million deaths annually [1]. The two most prevalent chronic respiratory diseases are asthma, which affects 358 million people

globally, and COPD, which affects 174 million people worldwide. Asthma is responsible for approximately 180,000 deaths worldwide each year [2]. Meanwhile, COPD deaths are eight times more frequent than asthma deaths [3] and, according to the World Health Organization, COPD is the third leading cause of death worldwide [4]. Additionally, COPD can contribute as a comorbidity to other fatal diseases such as Covid[5]. Asthma, on the other hand, is mainly caused by genetic inheritance or environmental factors such as poor air quality, dust, pollen, and animal dander [6]. Asthma and Chronic Obstructive Pulmonary Disease (COPD) are both chronic diseases that require long-term treatment. Asthma causes breathing difficulties, coughing, and shortness of breath, while COPD causes similar symptoms due to blockage of air sacs in the lungs called bronchi. Currently, there is no known cure for either disease. However, preventive medications and individual patient efforts can significantly improve quality of life and reduce morbidity and mortality. Air pollution has a direct impact on the quality of life of patients with asthma and COPD [7].

It can increase the risk of viral and bacterial infections, leading to breathing difficulties. Zhang et al. [8] reported that haze pollution and outdoor air pollutants are associated with hospitalisation rates of respiratory patients. Cai et al. [9] have reported that air pollution may contribute significantly to asthma exacerbations. Treatment of these diseases typically involves interventions to reduce symptom severity and discomfort, rather than eliminating the disease. The initial step in treatment should be to remove the patient from polluted environments. However, patients may not be able to monitor the air quality of their surroundings on a daily basis. Therefore, it is crucial for asthma and COPD patients to be aware of the air quality in their environment in order to control the disease effectively. Therefore, smart systems are needed to measure ambient air quality and provide feedback to patients. While many studies have been conducted to prevent respiratory disease triggers, this field remains an active area of research. Some relevant studies are as follow:

Abraham et al. [10] developed a low-cost air quality monitoring system using Arduino, XBee modules, and micro gas sensors. The system monitors six air quality parameters: carbon monoxide, carbon dioxide, ozone, volatile organic compounds, temperature, and humidity. The authors used the linear least squares method to calibrate the sensors and transform the measurement data.

Al-Dahoud et al. [11] employed wireless sensor networks to monitor air quality in metropolitan cities. Gas, temperature, and dust sensors were used to make measurements in the network nodes. Data transfer was achieved using Xbee modules from the module designed with the Arduino Uno microcontroller.

In a similar study, Husain et al. [12] monitored air quality in a system developed using the Arduino development board and Android technology. They measured levels of carbon dioxide, dust, and harmful gases with three sensors. The collected data is transferred to Android phones and computers via Bluetooth.

Kayyali et al. [13] designed a wearable vest to monitor physiological signals, such as weight, temperature, and blood pressure, of COPD patients.

Üçgün et al. [14] developed an IoT-based indoor air quality monitoring system using Raspberry Pi. The study measured temperature, humidity, gas, and light sensors and stored the data in a database. Furthermore, the authors developed a web interface for real-time monitoring of sensor data.

Jo et al. [15] To assess indoor air quality in real time, they developed a system where data can be transferred to the server in real time via an LTE modem. In their study, they aimed to evaluate indoor air quality by measuring aerosol concentration, VOC, CO, CO₂, temperature, and humidity values. The collected data was transferred to the server via LTE modem and stored in a database. The authors also developed an interface for accessing the stored data. An alert is triggered by considering the threshold values recommended by experts.

Janeera et al. [16] used Xmega and ESP8266 to measure the sound quality, dust, gas, humidity, and temperature of the environment. The data was instantly transferred to the ThingSpeak environment and monitored. Users were warned based on certain threshold values.

Hahm and Yoon [17] implemented two applications, Wireless Emergency Alert (WEA) and Air Quality Information Text (AIT), to reduce the exposure of patients with COPD, asthma, pneumonia and respiratory tract infections to harmful particulate matter. As a result, the number of patients visiting the hospital decreased.

In order to prevent asthma attacks in children, Alzoubi et al. [18] measured the temperature, humidity, dust, and carbon monoxide values of the air using sensors. They then sent this data to a smartphone application they developed using Bluetooth.

Typically, studies in the literature warn users based on certain threshold values after the sensor values are read. Alternatively, the values are saved on the server and monitored with the help of an interface. However, evaluating the suitability of the environment based solely on threshold values is insufficient. Pollutants can have negative effects even at low levels, which means that ambient values that meet the threshold may still be harmful. For instance, humidity in the air can cause particulate matter to remain suspended. To improve evaluation methods, it is important to develop an intelligent decision-making mechanism instead of relying on threshold values. Currently, there are no studies in this area. Therefore, this study aims to develop an IoT-based mobile alert system with a fuzzy logic inference mechanism to evaluate the environmental conditions of asthma and COPD patients. Sensor-measured air pollutant levels are evaluated using a fuzzy logic inference mechanism. Audio and visual alerts are then provided to individuals.

The study is divided into two parts: software and hardware. The hardware part involved measuring air pollutant levels using sensors. In the software part, a fuzzy-based controller was used to evaluate the air pollution level through a mobile application and provide patients with audible and visual warnings.

The paper's main contributions;

- A portable device has been developed that can instantly measure air pollution.
- An efficient pollution detection system was developed using the fuzzy logic method to evaluate the air pollution situation.
- An instant air pollution monitoring system was developed through a mobile application, which provides a danger warning when necessary.

The paper is organized as follows. Section 2 outlines the proposed method, while Section 3 details the experiments. The final section presents the discussion and conclusions.

2. Material and Method

2.1. Study Design

Asthma and COPD are chronic respiratory diseases that currently have no complete cure. The quality of life of patients is affected by the level of air pollution in their environment. Pollen, dust, high humidity, cigarette smoke, and various air pollutants are among the factors that negatively impact patients' quality of life. This study presents the development of a portable, mobile-supported, and fuzzy logic-based smart air quality warning device. The device can automatically measure dust concentration, air quality, humidity, temperature, and carbon monoxide (CO) values in indoor or outdoor environments. The data collected by the device's sensors are transferred to a web server. A mobile application has also been developed to enable patients to monitor the environment in real-time. The mobile application receives data evaluated by a fuzzy logic-based algorithm on the web server platform. An audible and visual warning is given if the air quality of the environment is unsuitable for the patient. Figure 1 shows the proposed system diagram.

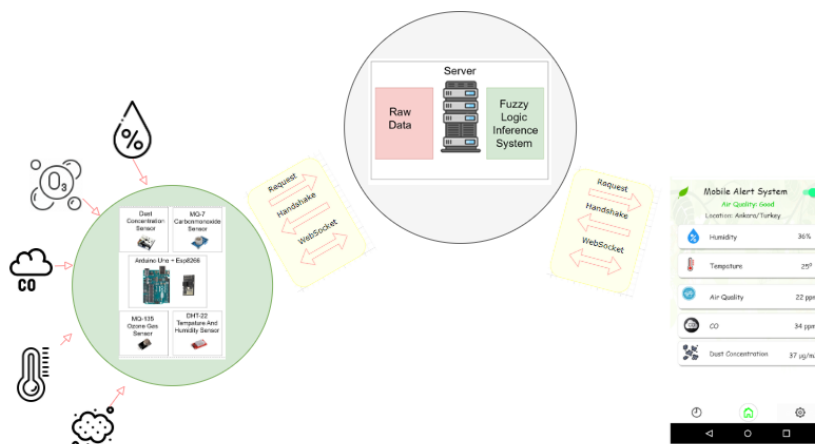


Figure 1. Proposed System Diagram (Handshake: a reliable connection between two devices over a network)

2.2. Circuit Design

The development board used in this study uses the ESP8266 module to connect Arduino Uno to the Internet. Arduino Uno has an ATmega328 microcontroller on it. Arduino Uno has 14 digital I/O output pins. 6 of them can be used as PWM output. There are also 6 analogue inputs, a 16MHz crystal oscillator, USB connector, power connector (2.1mm), ICSP header and reset button. The technical specifications of the Arduino Uno development board are listed in Table 1.

Table 1. Specification of Arduino Uno

Specification	Value
Microprocessor	ATmega328
Operating Voltage	+5.V DC
Dc Current Per I/O Pin	20mA
Flash Memory	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1KB
Length	68.6mm
Width	53.4mm
Weight	25g

The study used the MQ-7 Carbon Monoxide, MQ-135 Air Quality, DHT-22 Humidity-Temperature and GP2Y1010AU0F Dust Sensors to measure air pollution status. The MQ-7 is a highly sensitive carbon monoxide (CO) sensor designed to measure CO concentrations in air. It is suitable for real-time observations with high sensitivity and response time. The MQ-135 gas sensor measures ammonia, benzene and hydrogen at concentrations from 10 to 10,000 ppm. The GP2Y1010AU0F is an optical sensor designed to measure dust particles in air. It uses an infrared emitting diode and a phototransistor to detect light reflected from dust in the air. It is effective in detecting very fine solid particles. The DHT22 temperature and humidity sensor is an advanced sensor unit that outputs a calibrated digital signal. In addition, 2 8x8 LED matrices have been used to warn the device when the phone is out of charge. The connection diagrams of the sensor, module and LED matrices used in the study are shown in Figure 2. The system is highly reliable and stable in long-term operation. Details of the measurement ranges of the sensors are given in Table 2.

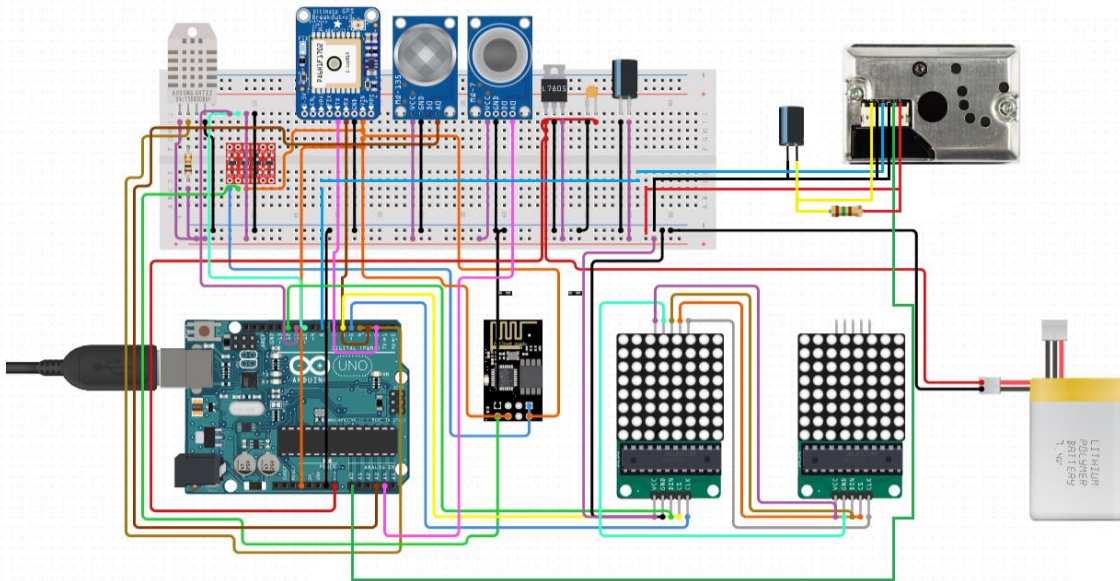


Figure 2. Connection Circuit of Components

Table 2. Technical Specification of sensors

Sensor	Specification	Value
MQ-7	Concentration	10-10.000ppm
MQ-135	Concentration	000ppm
DHT-22	Humidity Range	0-100%RH
	Tempature	-40 - (+80) °C
GP2Y1010AU0F	Detectable particle size	0 -600 µg/m3



Figure 3. Prototype of the Alert System

The prototype system is also shown in Figure 3. Using the NodeMCU-ESP8266 module and sensors for humidity, temperature, carbon monoxide, ozone and particulate matter, the values affecting the air quality of the environment were measured. A web socket approach was used for immediate evaluation of the values obtained. A mobile application was developed to allow the user to continuously monitor the values and to provide audible and visual warnings when the air quality is inadequate. The mobile application and the developed device can exchange data instantly via a web socket. In this way, the patient can immediately monitor his environment and is automatically warned by the application in case of a possible situation.

2.3. Fuzzy Logic

A fuzzy logic algorithm, an artificial intelligence algorithm, was used to evaluate the data. The main reason for using the fuzzy logic algorithm is to detect synergistic situations. In classical methods, air quality is measured with fixed position devices. Since the developed device is portable, the patient can always have it with him/her. In addition, as the device transmits the readings to the server, more than one mobile application can use the same data. This makes it suitable for collective use as well as individual use. Fuzzy logic [19] is an artificial intelligence algorithm inspired by human behaviour and the way nature works. Its main purpose is to create decision-making processes that model human thinking mechanisms. It enables the evaluation of imprecise sentences used by humans in everyday language. For example, vague sentences such as "very close", "partially correct", "medium weight" cannot be expressed numerically, although they help to solve problems. In such cases, the fuzzy logic algorithm mimics the human mind, resulting in fuzzy solutions and numerical modelling.

Fuzzy logic consists of 3 parts: fuzzification, inference mechanism and defuzzification. Fuzzification is the stage where input values are converted into verbal expressions. The inference mechanism is the processing of inputs according to the rule base. The output value of the value is obtained in the defuzzification part. In this study, the evaluation of the data obtained from the sensors was carried out using the fuzzy logic algorithm. The main reason for using the fuzzy logic algorithm is the detection of synergistic situations. Figure 4 shows the proposed fuzzy inference mechanism.

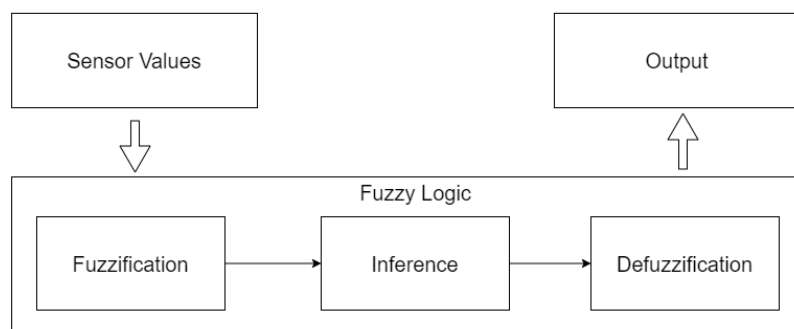


Figure 4. Fuzzy Logic Inference System

Fuzzification

Fuzzification is the conversion of numerical values given as input to the system into fuzzy values using appropriate linguistic qualifiers. With the membership function, the set to which the input information belongs and the degree of membership can be determined. Different fuzzification methods have been used in the literature. In this study, a trapezoidal fuzzifier is used. As a result of the literature review, the membership values of the verbal expressions corresponding to the numerical data obtained from the sensors were determined and shown in Table 3 [20-23].

Table 3. Membership values of sensor data used for air quality measurement

Pollutant	Range	Status
Carbonmonoxide	Ppm	
	0-100	Good
	100-200	Moderate
	200-250	Poor
	250-500	Very Poor
	500-1000	Unhealthth
Air Quality	Ppm	
	0-100	Good
	100-200	Moderate
	200-300	Poor
	300-400	Very Poor
	400-500	Unhealthy
Dust Concentration	µg/m3	
	0-50	Good
	50-100	Moderate
	100-200	Unhealthth
	200-300	Very Unhealthy
	300-600	Hazardous
Humidity	relative(%)	
	0-30	Dry
	30-60	Good
	50-100	Humid
Tempature	°C	
	-2-(18)	Cool
	18-22	Normal
	20-27	Warm
	25-35	Hot
	35-50	Very Hot
Air Quality Index	Index	
	0-50	Good
	50-100	Moderate
	100-300	Unhealthy

The membership functions are shown in Figure 5.

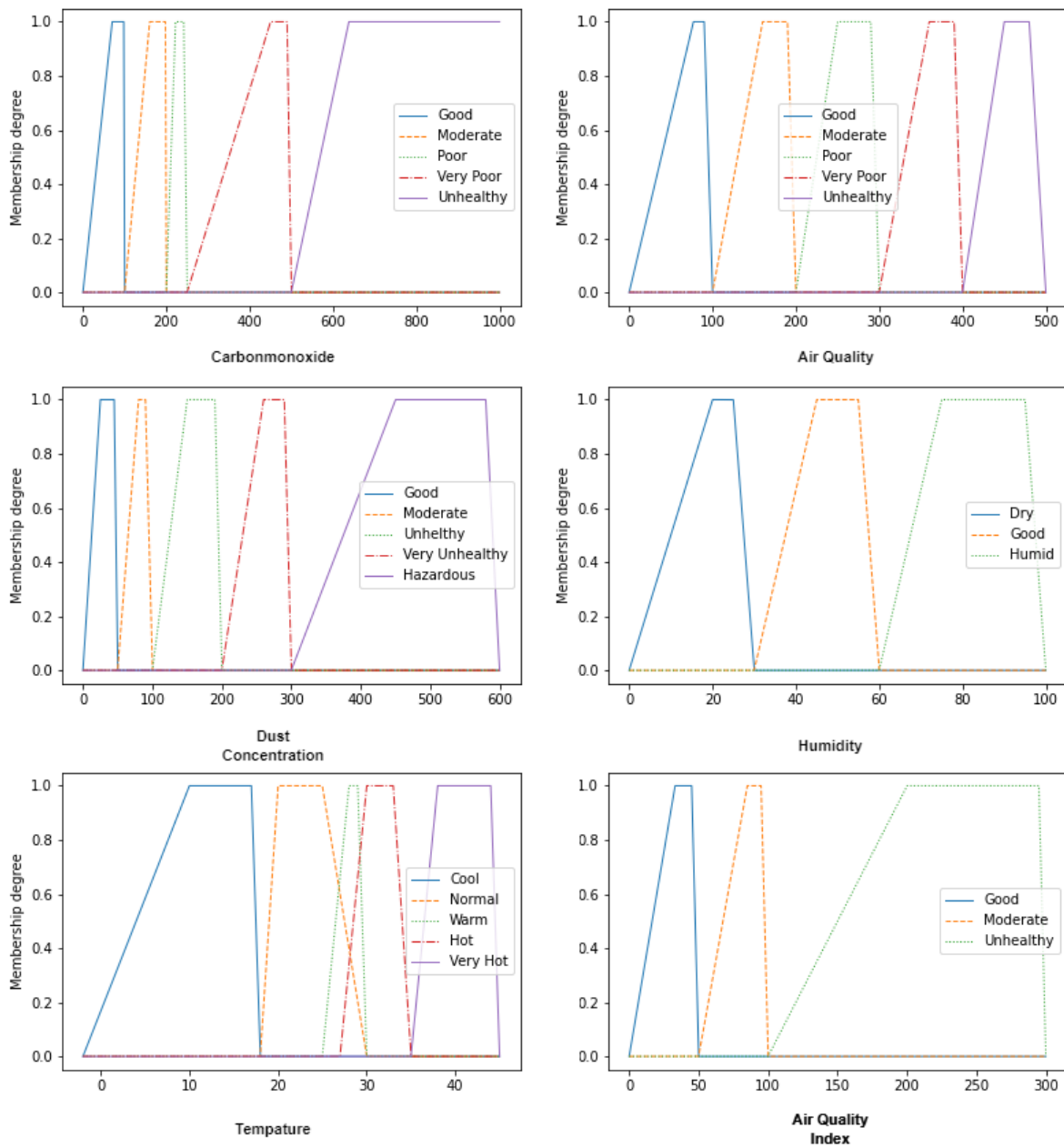


Figure 5. Membership function values for sensor data

Inference Mechanism and Rule Base

In the study, a rule base was created with the expert physician by using the lower and upper limit values of the values taken from the sensors. The rules plays a crucial role in the fuzzy inference mechanism, which is the core of the device's decision-making process for evaluating air quality. Table 4 shows some of the fuzzy rules employed within the device's rule base.

Table 4. Some rules used in fuzzy rule base

Carbonmonoxide	Op.	Air Quality	Op.	Dust Concentration	Op.	Humidity	Op.	Temperature	Air Quality Index
Good	And	Good	And	Good	And	Good	And	Normal	Good
Moderate	And	Good	And	Moderate	And	Dry	And	Warm	Moderate
Poor	And	Moderate	And	Unhealthy	And	Humid	And	Hot	Unhealthy

Very Poor	And	Moderate	And	Very Unhealthy	And	Good	And	Cool	Unhealthy
Unhealthy	And	Poor	And	Hazardous	And	Dry	And	Very Hot	Unhealthy
Good	And	Poor	And	Good	And	Humid	And	Normal	Moderate
Moderate	And	Very Poor	And	Moderate	And	Good	And	Warm	Moderate
Poor	Or	Very Poor	And	Unhealthy	And	Dry	And	Hot	Unhealthy
Very Poor	Or	Unhealthy	And	Very Unhealthy	And	Humid	And	Cool	Unhealthy
Unhealthy	Or	Unhealthy	And	Hazardous	And	Good	And	Very Hot	Unhealthy
Good	Or	Good	And	Good	And	Dry	And	Normal	Good
Moderate	Or	Good	And	Moderate	And	Humid	And	Warm	Good
Poor	Or	Moderate	And	Unhealthy	And	Good	And	Hot	Unhealthy
Very Poor	And	Poor	And	Very Unhealthy	And	Dry	And	Cool	Unhealthy
Unhealthy	And	Poor	And	Hazardous	And	Humid	And	Very Hot	Unhealthy

Defuzzification

Defuzzification is a method used to transform a fuzzy set (fuzzy output) into a precise output. Defuzzification is an inverse transformation compared to defuzzification because in this process the fuzzy output is converted into precise values to be applied to the system. In this study, the centroid method is used. The exact value is calculated using equation 1. In equation 1, X represents the defuzzification value, n represents the subareas, A_i represents the area of the current subarea and x_i represents the centre of gravity of the current subarea.

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \tag{1}$$

2.4. Web Server

Web applications communicate with the server via the HTTP protocol using request/response logic. When the client requests something from the server, a connection is opened and a request is sent. The server receives the request and performs the necessary actions. The server sends a response back to the client. This traffic goes on all the time. The client has to open a connection for each request. The classic HTTP protocol is not sufficient when real-time communication is required. WebSocket is a computer communication protocol that provides a full bi-directional communication channel over a single TCP connection. Unlike the HTTP protocol, the connection remains open until terminated by either party. It is used in situations where real-time data is streaming. The Web Socket architecture used in the study was developed in the Asp.Net Core environment.

2.5. Mobile Application

Using the developed device, the data received from the sensors is transferred to the server via the wes socket protocol. A mobile application was developed to monitor the data immediately and to warn the patient in case of a possible risk. The mobile application has been developed in the Android environment. In addition, the patient does not need to open the mobile application, the application continuously performs the control process with the code it runs in the background. Screenshots of the developed mobile application are shown in Figure 6.

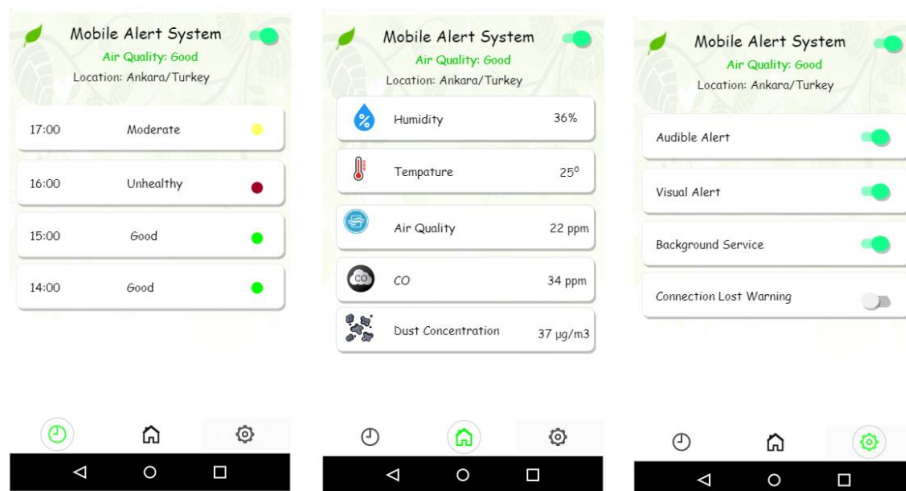


Figure 6. Mobile Application Screens

Results and Discussions

Respiratory diseases are made worse when people are exposed to air pollution. People with asthma and COPD in particular have to cope with attacks, choking coughs and rescue medication in smoggy air. Asthma and COPD are chronic (lifelong) conditions for which there is no permanent cure. However, they can be prevented if they are controlled. Quitting smoking, reducing indoor and outdoor air pollution and avoiding occupational dusts and chemicals are essential in preventing these diseases. It is therefore important for patients to be able to monitor the quality of the air in their environment. Different methods are used to measure air pollution. One of them is the measurement technique using mobile (mobile) vehicles. Air quality is determined by measuring pollution and particles in the air. This system is currently used by local authorities. As these tools are quite expensive, measurements are only taken when necessary or at specific times (about 1 or 2 times a month). Unlike stable, mobile (portable) air pollution monitors, they are only available at monitoring stations located in a specific region (province, district). These are systems that operate on 220V-380V electricity. Cihazların ölçtüğü değerler yerel yönetimin sistemine gönderilir. The limitations of these systems are that they cannot provide information on indoor air pollution and can only measure regional levels. Within the framework of this research, a portable, mobile-based warning device has been developed that can automatically measure dust concentration, air quality, humidity, temperature and carbon monoxide (CO) levels in an indoor or outdoor environment. The sensors built into this device allow measurements to be taken automatically at set intervals and sent to the server. In addition, a mobile application has been developed to monitor the sensor readings in real time. Additionally, a continuous evaluation is done in the background, and the user is warned visually and audibly in case of potential risk. The developed device only weighs 160gr. Thus, it is portable, and patients can use the mobile application to measure active values and learn about the suitability of the environment whenever and wherever they want. The developed device was tested in different conditions. The sensor values that the device warns about are shown in Table 5.

Table 5. Device Test Results

Humidity(%)	Temperature(°)	Air Quality(ppm)	CO(ppm)	Dust Concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Alert
35	30	75	58	15	Unhealthy
22	20	50	12	165	Unhealthy
15	18	120	100	35	Unhealthy
45	35	20	14	25	Unhealthy
35	30	12	10	15	Healthy

The surface plots of the fuzzy logic rules used to determine the air quality index are visualised in Figure 7. By analysing these plots, it is possible to observe interactions between different environmental factors. It's not just the individual sensor readings that affect air quality, but the combined effect of these factors. The plots show a synergistic relationship between humidity and temperature. High humidity can trap dust particles and other pollutants in the air, making them more problematic, especially at higher temperatures. This can exacerbate respiratory problems in people with asthma and COPD. Similarly, the graphs indicate a synergistic effect between the air quality sensor reading (representing a combination of pollutants) and carbon monoxide levels. The presence of carbon monoxide alongside other pollutants can create a more dangerous environment for patients. The graphs also show the interaction between dust concentration and humidity. High dust concentrations can be more irritating in humid environments, leading to increased discomfort and potential respiratory complications. These findings highlight the importance of considering the complex interplay between environmental factors when assessing air quality. A single sensor reading may not be sufficient to determine air quality. By using fuzzy logic, this system can take into account these synergistic effects and provide a more comprehensive assessment of air quality risk for patients with respiratory diseases.

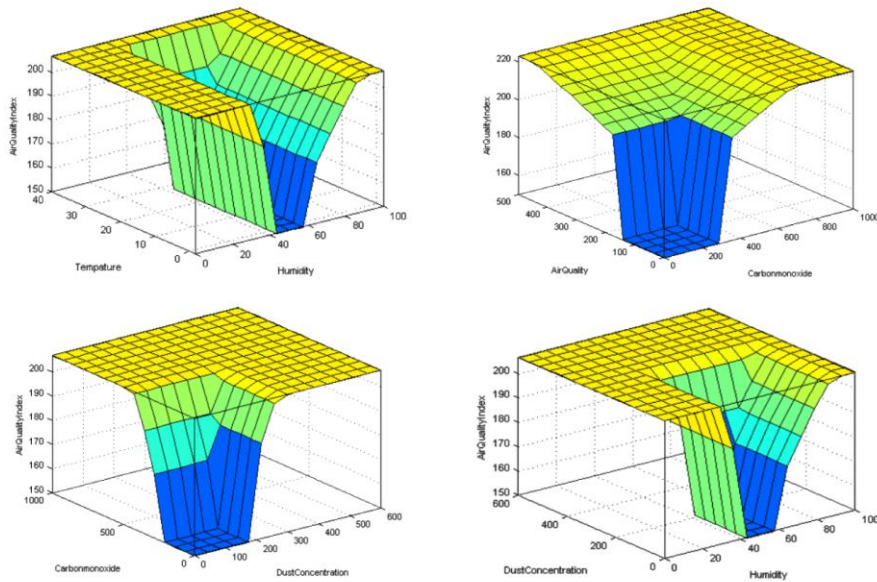


Figure 7. Surface plots of input and output values

In conclusion, in this study a portable, mobile and fuzzy logic based intelligent air quality warning device for patients with asthma and COPD was presented. The device can measure dust concentration, air quality, humidity, temperature and carbon monoxide (CO) levels. Sensor data is transmitted to a web server and a mobile application allows patients to monitor their environment in real time. A fuzzy logic algorithm evaluates the sensor data to provide audible and visual alerts when air quality poses a health risk. This system has several advantages over traditional methods. Unlike stationary air pollution monitors, the proposed device is portable and can be used indoors or outdoors. In addition, the fuzzy logic algorithm provides a more nuanced assessment of air quality than simple threshold-based methods. The lightweight design and real-time monitoring capabilities make this system a valuable tool for asthma and COPD patients to manage their condition.

Acknowledgements

We want to special thanks to Aysun Yurdakul who is medical doctor in Selçuk University for her assistance in prepreparing fuzzy data set.

References

- [1] T. Ferkol and D. Schraufnagel, "The global burden of respiratory disease," *Ann Am Thorac Soc*, vol. 11, no. 3, pp. 404–406, Mar. 2014, doi: 10.1513/AnnalsATS.201311-405PS.
- [2] P. Burney, D. Jarvis, and R. Perez-Padilla, "The global burden of chronic respiratory disease in adults," *Int J Tuberc Lung Dis*, vol. 19, no. 1, pp. 10–20, Jan. 2015, doi: 10.5588/ijtld.14.0446.
- [3] GBD 2015 Chronic Respiratory Disease Collaborators, "Global, regional, and national deaths, prevalence, disability-adjusted life years, and years lived with disability for chronic obstructive pulmonary disease and asthma, 1990-2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015," *Lancet Respir Med*, vol. 5, no. 9, pp. 691–706, Sep. 2017, doi: 10.1016/S2213-2600(17)30293-X.
- [4] "The top 10 causes of death." Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
- [5] F. V. Gerayeli et al., "COPD and the risk of poor outcomes in COVID-19: A systematic review and meta-analysis," *EclinicalMedicine*, vol. 33, p. 100789, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.eclinm.2021.100789.
- [6] S. Musafiri et al., "Prevalence of atopy, asthma and COPD in an urban and a rural area of an African country," *Respiratory Medicine*, vol. 105, no. 11, pp. 1596–1605, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.rmed.2011.06.013.
- [7] M. Darçın, "Association between air quality and quality of life," *Environ Sci Pollut Res*, vol. 21, no. 3, pp. 1954–1959, Feb. 2014, doi: 10.1007/s11356-013-2101-3.
- [8] Z. Zhang et al., "Impact of haze and air pollution-related hazards on hospital admissions in Guangzhou, China," *Environ Sci Pollut Res*, vol. 21, no. 6, pp. 4236–4244, Mar. 2014, doi: 10.1007/s11356-013-2374-6.
- [9] J. Cai et al., "Acute effects of air pollution on asthma hospitalization in Shanghai, China," *Environ Pollut*, vol. 191, pp. 139–144, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.envpol.2014.04.028.
- [10] S. Abraham and X. Li, "A Cost-effective Wireless Sensor Network System for Indoor Air Quality Monitoring Applications," *Procedia Computer Science*, vol. 34, pp. 165–171, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.procs.2014.07.090.

- [11] A. Al-Dahoud, M. Fezari, I. Jannoud, and T. A. Al-Rawashdeh, "Monitoring Metropolitan City Air-quality Using Wireless Sensor Nodes based on ARDUINO and XBEE," Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Monitoring-Metropolitan-City-Air-quality-Using-on-Al-Dahoud-Fezari/e0400014e15b672bbf2342833cd35a511fcb6869>
- [12] A. M. Husain, T. Rini, M. Haque, and M. R. Alam, "Air Quality Monitoring : The Use of Arduino and Android," 2016. Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Air-Quality-Monitoring-%3A-The-Use-of-Arduino-and-Husain-Rini/45915b48d382a6619683bc69218eccd5148115f9>
- [13] R. Kayyali et al., "Qualitative investigation into a wearable system for chronic obstructive pulmonary disease: the stakeholders' perspective," *BMJ Open*, vol. 6, no. 8, p. e011657, Aug. 2016, doi: 10.1136/bmjopen-2016-011657.
- [14] H. Üçgün, F. Gömbeçi, U. Yüzgeç, and N. Yalçın, "IoT Tabanlı Platform ile Gerçek Zamanlı İç Ortam Hava Kalitesi İzleme Sistemi," *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 7, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2020, doi: 10.35193/bseufbd.730919.
- [15] J. Jo, B. Jo, J. Kim, S. Kim, and W. Han, "Development of an IoT-Based Indoor Air Quality Monitoring Platform," *Journal of Sensors*, vol. 2020, p. e8749764, Jan. 2020, doi: 10.1155/2020/8749764.
- [16] D. A. Janeera, H. Poovizhi, S. S. Sheik Haseena, and S. Nivetha, "Smart Embedded Framework using Arduino and IoT for Real-Time Noise and Air Pollution Monitoring and Alert system," in *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, Mar. 2021, pp. 1416–1420. doi: 10.1109/ICAIS50930.2021.9396041.
- [17] Y. Hahm and H. Yoon, "The impact of air pollution alert services on respiratory diseases: generalized additive modeling study in South Korea," *Environ. Res. Lett.*, vol. 16, no. 6, p. 064048, May 2021, doi: 10.1088/1748-9326/ac002f.
- [18] K. Alzoubi, M. Al-bzoor, O. Aljalalma, and M. Ali, "Air Quality Monitoring and Alerting System to Help in Reducing Asthma Attack in Asthmatic Children," presented at the *International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies (BIOSTEC)*, SCITEPRESS, Feb. 2021, pp. 91–98. doi: 10.5220/0009971200002865.
- [19] L. A. Zadeh, "Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing," in *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems*, vol. Volume 6, in *Advances in Fuzzy Systems ? Applications and Theory*, no. Volume 6, vol. Volume 6, , WORLD SCIENTIFIC, 1996, pp. 775–782. doi: 10.1142/9789814261302_0040.
- [20] J. Ahn, D. Shin, K. Kim, and J. Yang, "Indoor Air Quality Analysis Using Deep Learning with Sensor Data," *Sensors*, vol. 17, no. 11, Art. no. 11, Nov. 2017, doi: 10.3390/s17112476.
- [21] C. Johnes, R. A. Sharpe, T. Menneer, T. Taylor, and P. Nestel, "Using Sensor Data to Identify Factors Affecting Internal Air Quality within 279 Lower Income Households in Cornwall, South West of England," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 20, no. 2, p. 1075, Jan. 2023, doi: 10.3390/ijerph20021075.
- [22] J. Buelvas, D. Múnera, D. P. Tobón V., J. Aguirre, and N. Gaviria, "Data Quality in IoT-Based Air Quality Monitoring Systems: a Systematic Mapping Study," *Water Air Soil Pollut*, vol. 234, no. 4, p. 248, Apr. 2023, doi: 10.1007/s11270-023-06127-9.
- [23] A. Gressent, L. Malherbe, A. Colette, H. Rollin, and R. Scimia, "Data fusion for air quality mapping using low-cost sensor observations: Feasibility and added-value," *Environment International*, vol. 143, p. 105965, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105965.

Mechanical Properties and Deformation Behavior of Al/Al-SiC Double-Walled Composite Pipes Under Radial Loading

İsmet Aydın Yılmaz¹ , Abdullah Göçer^{*1} , M. Baki Karamış¹ 

^{*1}Erciyes University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, KAYSERİ

(Alınış / Received: 07.11.2023, Kabul / Accepted: 02.03.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

Keywords

Double-walled pipe,
SiC,
Extrusion,
Flattening test

Abstract: Composite materials are produced in different material structures depending on their production purposes. This study aimed to produce a circular profile material with partially preserved deformation capability while increasing its strength properties. The composite material was produced with double walls and the outer wall consisted of Al6061 (6061 aluminum alloy) and the inner wall consisted of Al2124-SiC (2124 aluminum alloy-silicon carbide) metal matrix composite. Material variables were the variation of wall thicknesses and SiC reinforcement ratios. The materials were produced in 3 different wall configurations with inner and outer wall thicknesses of 1.5-0.5 mm, 1-1 mm, and 0.5-1.5 mm, respectively. SiC reinforcement ratios were determined as 3, 7, and 11%. The materials were produced by the extrusion method and extrusion variables such as temperature (500 °C) and die angle were kept constant. The produced materials were exposed to flattening tests. According to the test results, the flattening resistance of the materials increased with the SiC reinforcement in the inner layer and with the increase in the reinforcement ratio. This increase started to decrease at the 11% reinforcement rate. Likewise, the strength, which increased with the increase in the thickness of the inner wall, decreased as the inner wall reached its highest value. While the Al6061 material, which has a ductile structure, did not show any failure in full flattening, with the increasing inner wall thickness and SiC ratio, failures occurred in double-walled materials both in the lateral regions and at the material-jaw contact points.

Al/Al-SiC Çift Cidarlı Kompozit Boruların Radyal Yüklemeler Altında Mekanik Özellikleri ve Deformasyon Davranışları

Anahtar Kelimeler

Çift katmanlı boru
SiC,
Ekstrüzyon
Yassılma testi

Öz: Kompozit malzemeler üretim amaçlarına bağlı olarak farklı malzeme yapılarında üretilirler. Bu çalışmada mukavemet özelliklerinin artırılması ile beraber şekil değiştirme kabiliyeti kısmen korunan bir dairesel profil malzeme üretilmesi amaçlanmıştır. Malzeme çift cidarlı üretilmiş olup dış cidar Al6061, iç cidar ise Al2124-SiC metal matrisli kompozitten oluşmaktadır. Malzeme değişkenleri cidar kalınlıklarının ve SiC takviye oranlarının değişimidir. Malzemeler, iç-dış cidar kalınlıkları sırasıyla 1.5-0.5 mm, 1-1 mm ve 0.5-1.5 mm olacak şekilde 3 farklı kalınlıkta üretilmiştir. SiC takviye oranları % 3, 7 ve 11 olarak belirlenmiştir. Malzemeler ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş olup sıcaklık (500 °C) ve kalıp açısı gibi ekstrüzyon oranları sabit tutulmuştur. Üretilen malzemeler radyal yönde yüklemelere maruz bırakılarak yassılma testlerine tabi tutulmuşlardır. Test sonuçlarına göre iç katmandaki SiC takviyesi ve takviye oranının artması ile malzemelerin akma dirençleri artmıştır. Bu artış % 11 takviye oranında düşmeye başlamıştır. Aynı şekilde iç cidarın kalınlığının artması ile artan mukavemet iç cidarın en yüksek değerine çıkması ile düşüş göstermiştir. Sünek bir yapıya sahip olan Al6061 malzeme tam yassılamada kırılma hasarı göstermezken artan iç cidar

kalınlığı ve SiC oranı ile birlikte malzemelerde hem yanal bölgelerde hem de temas noktalarında kırılmalar oluşmuştur.

*İlgili Yazar, email: abdullahgocer@erciyes.edu.tr

1. Introduction

Particle-reinforced metal matrix composites are used in many areas due to their superior properties. The main features of these are high strength, low density, and high wear resistance [1,2,3]. In metal matrix composites, materials such as aluminum, magnesium, and copper are preferred as the metal phase because of their good forming and strength properties, and ceramic particles such as Al₂O₃, SiC, and B₄C are preferred as the reinforcement phase due to their high hardness, low density, and good strength properties [4, 5, 6, 7]. Metal matrix composites are produced in different structures. Radial plain bearings, shafts, sheet, and plate forms can be given as examples [8, 9, 10]. In addition, composite materials are produced in hollow circular or square cross-section profile forms. The studies of Mahmoodi and others on Al-SiC pipe can be given as an example [11]. In this study, the researchers used the friction stir-back extrusion method to produce Al-SiC Composite Tube materials and examined the mechanical properties of the composites they obtained. Profile materials with improved strength values and reduced intensity can be used as chassis material in vehicles such as bicycles and motorcycles where these features are important.

With the addition of ceramic particles, metal matrix composites exhibit improved strength values up to a certain proportion of particles [12]. Along with increasing strength, ceramic particles, whose structure is quite rigid, also increase the rigidity of the composite material [13]. By producing metal matrix composites in layers, the properties of the material such as rigidity, hardness, and toughness can be balanced or changed at different rates along the material cross-section [14]. There are also studies examining the strength properties and ballistic behavior of metal matrix composites produced in layers [15]. This study focuses on a circular composite material produced layer by layer. In this study, SiC-reinforced Al2124 metal matrix pipe profile material was layered by coating Al6061 on its outer surface. Thus, it was aimed to produce a more ductile composite material compared to the without-layer structure. In the production of double-walled materials, some methods can be used like explosion welding [16], magnetic pulse cladding [17], and extrusion [18]. In this study, mandrel -supported extrusion method was used in the production of composite materials due to the suitability of the shaping properties of the materials. Flattening tests of this material were performed to examine how its stiffness and deformation pattern changed.

2. Material and Method

The outer wall of the double-walled pipes produced within the scope of the study was Al6061, and the inner wall was Al2124-SiC metal matrix composite. Al6061 was preferred as the outer layer because it is a more ductile aluminum alloy (Table 1). Al2124 is an aluminum alloy with high mechanical properties and is suitable for plastic forming (Table 2). For this reason, it was thought that the use of the inner layer would be appropriate. In metal matrix materials, SiC is frequently used with Al alloys as a reinforcement material and gives very good results in terms of strength. Al6061 and Al2124-SiC were combined with three different thickness values. The total wall thickness of the pipes was 2 mm, and these layers were set as 1.5-0.5, 1-1, and 0.5-1.5 mm, respectively (Fig. 3). The SiC reinforcement ratio in the inner layer was determined as 3, 7 and 11% by volume fraction. Al2124 and SiC powders were combined in these ratios and mixed in a three-dimensional ball mixer for 2 hours. SiC ceramic particles with an average particle size of 20 µm and Al2124 powder with an average particle size of 40 µm were used in a single size (Fig. 1). Composite materials were produced by the mandrel-assisted extrusion method (Fig. 2). For this process, extrusion billets were prepared using the powder-in-tube method. For this, firstly, a mandrel was placed inside the Al6061 tubes, and Al2124-SiC powder mixtures were compressed under the press between the mandrel and the Al6061 tube. The prepared billets were sintered at 500 °C for 2 hours and then extruded at the same temperature. The obtained materials and material variables are shown in Table 3.

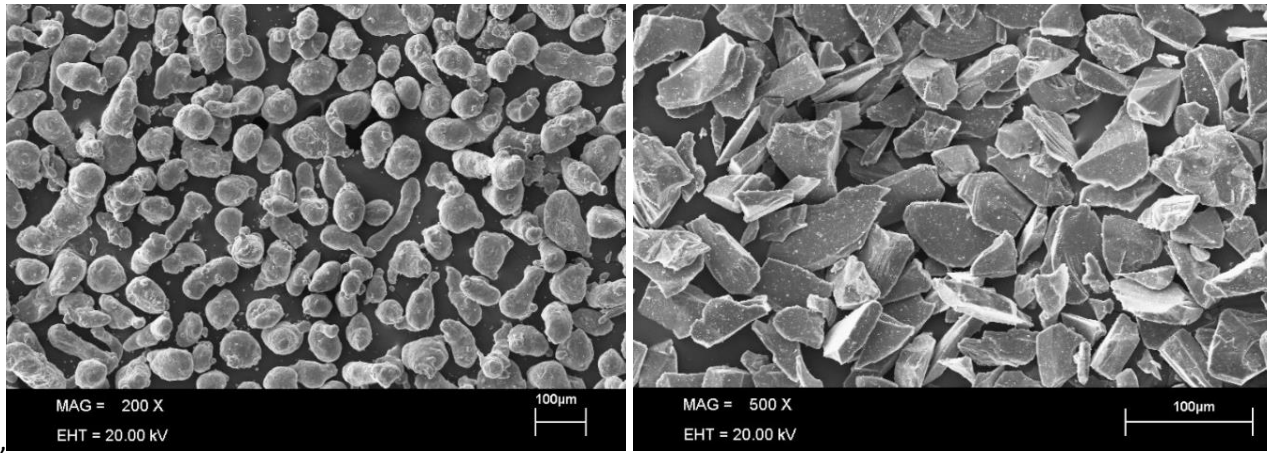


Figure 1. SEM images of a) Al2124 powder, b) SiC particles

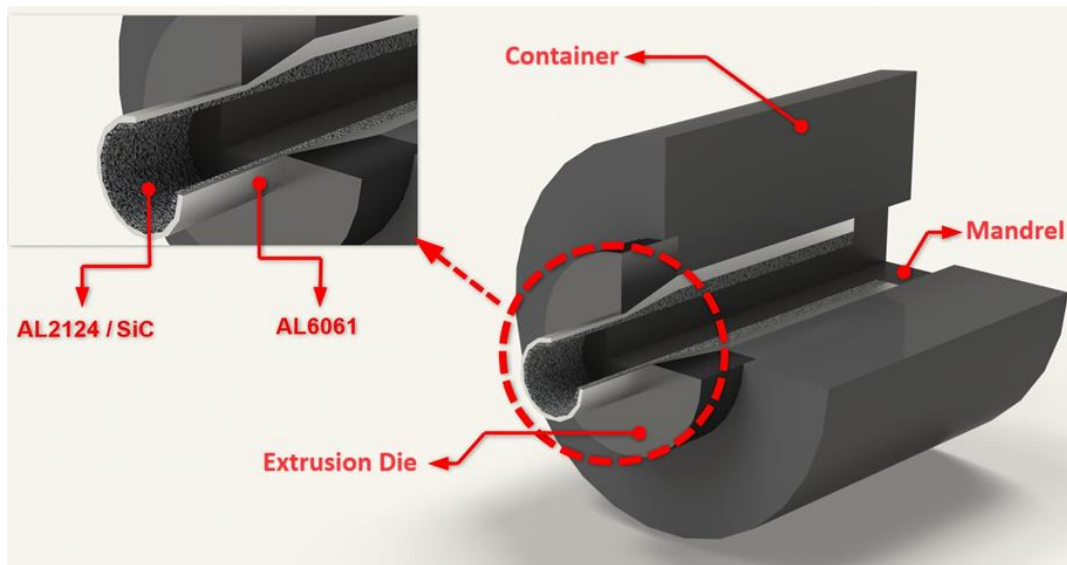


Figure 2. Application principle of mandrel-assisted extrusion method.

Table 1. Chemical content of Al2124 (wt %)

<i>Fe</i>	<i>Si</i>	<i>Cu</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Al</i>
0.23	0.76	2.99	0.01	0.21	0.76	0.08	94.57

Table 2. Chemical content of Al6061 (wt %)

<i>Al</i>	<i>Cr</i>	<i>Si</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Ti</i>	<i>Fe</i>
95.8-	0.04-	0.4-	0.15-	0.15	0.8-	<0.25	< 0.15	< 0.7
98.6	0.35	0.8	0.4		1.2			

Table 3. Produced composite materials and production variables

Composite Codes	Material of outer wall	Outer wall thickness (mm)	Material of inner wall	Inner wall thickness (mm)	SiC ratio in inner wall (%)
Al6061	<i>Al6061</i>	2	-	-	-
1_0	<i>Al6061</i>	1,5	<i>Al2124</i>	0,5	0
1_3	<i>Al6061</i>	1,5	<i>Al2124/SiC</i>	0,5	3
1_7	<i>Al6061</i>	1,5	<i>Al2124/SiC</i>	0,5	7
1_11	<i>Al6061</i>	1,5	<i>Al2124/SiC</i>	0,5	11
2_0	<i>Al6061</i>	1	<i>Al2124</i>	1	0
2_3	<i>Al6061</i>	1	<i>Al2124/SiC</i>	1	3
2_7	<i>Al6061</i>	1	<i>Al2124/SiC</i>	1	7
2_11	<i>Al6061</i>	1	<i>Al2124/SiC</i>	1	11
3_0	<i>Al6061</i>	0,5	<i>Al2124</i>	1,5	0
3_3	<i>Al6061</i>	0,5	<i>Al2124/SiC</i>	1,5	3
3_7	<i>Al6061</i>	0,5	<i>Al2124/SiC</i>	1,5	7
3_11	<i>Al6061</i>	0,5	<i>Al2124/SiC</i>	1,5	11

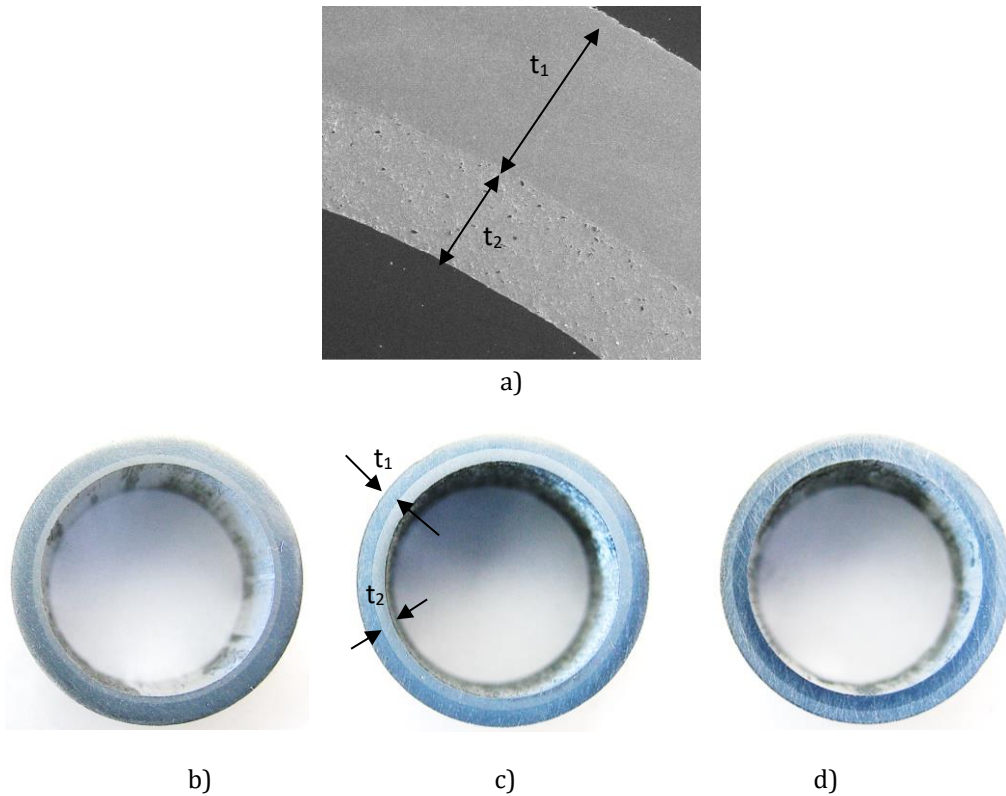


Figure 3. Cross-sectional images of composite pipes with different wall thicknesses, a) SEM image of the wall structure of the material, b) $t_1=1.5$ mm $t_2=0.5$ mm, c) $t_1=1$ mm $t_2=1$ mm, d) $t_1=0.5$ mm $t_2=1.5$ mm

In the flattening test, samples are carried out by applying compression tests on the radial axis of the material in tensile-compression testing devices (Fig. 4). With this test, the strength of the welding areas of welded pipes or the radial deformation ability of the materials can be observed [19, 20]. Therefore, in this study, flattening tests were applied to see the stress and strain properties of composite pipes in the radial direction. Samples were cut from the produced composite materials with 16 mm wide for flattening tests. The flattening tests were carried out according to ISO 8492 standards [21] with the MTS Tensile-Compression test device.

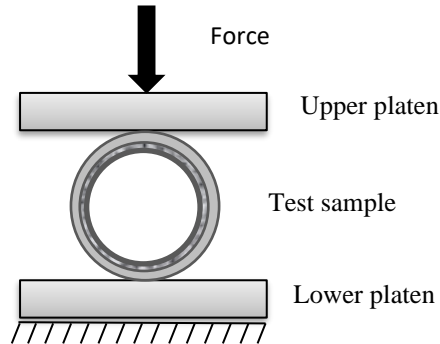


Figure 4. Application principle of the flattening test

3. Results

Flattening test curves of composite pipe samples were drawn with force-deformation values. The results were evaluated based on the change of SiC reinforcement ratio at equal wall thickness and the wall thickness changes at constant SiC ratios. In materials with thick outer walls, the resistance to radial forces increased as the materials were double-walled and the SiC reinforcement on the inner wall increased (Fig. 5). This increase was achieved because of Al2124 which has better mechanical properties than Al6061 and thanks to SiC reinforcement. At constant wall thicknesses, the flattening resistance of the materials increased with the increase of SiC reinforcement and reinforcement ratio. This situation was observed at three wall thickness ratios (Fig. 5a-c). However, it was seen from the curves that as the thickness of the inner wall increased, the plastic deformation rates decreased and the number of damage formations increased. Another situation observed in materials reinforced with SiC was the change in the damage pattern. When the curves of the Al6061 and Al6061-Al2124 materials with the thinnest inner wall were examined, it was seen that the materials changed shape completely with plastic deformation without showing any failure damage (Fig 6-a). In Al6061-Al2124 materials, where the inner wall is thick, failure damage occurred on the outer walls towards the end of the tests (Fig. 6-d). Also, failure damage was observed at lower displacements with increasing SiC reinforcement ratio in SiC-reinforced composites. This damage was seen in the upper and lower middle parts of the materials where the outer wall was thickest (Fig. 6-b-c). The reason for this damage is that the materials are exposed to compressive stress on the outside and tensile stress on the inside in these regions (Fig. 7). Also in particle-reinforced composites, the toughness decreases with the reinforcement (Fig. 8). Therefore, the plastic deformation ability decreases under tension loads [22]. In the materials with different wall thicknesses, increasing the SiC reinforcement gave similar results. However, in materials with thicker composite inner walls, the amount of displacement decreased until failure damage (Fig. 5-c) because the rigidity increased with the increase of the composite inner wall.

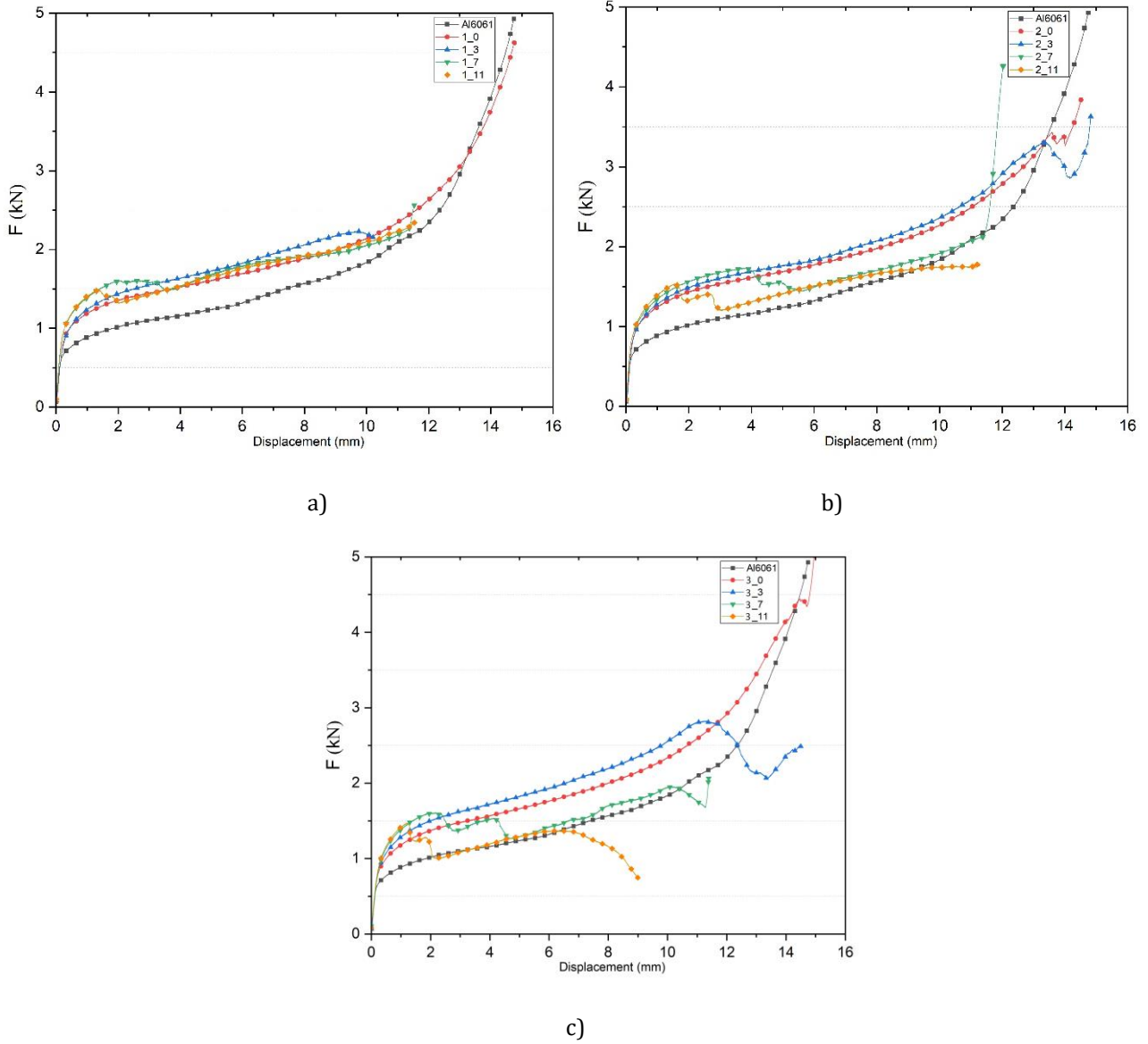
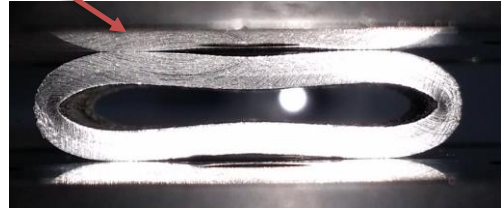
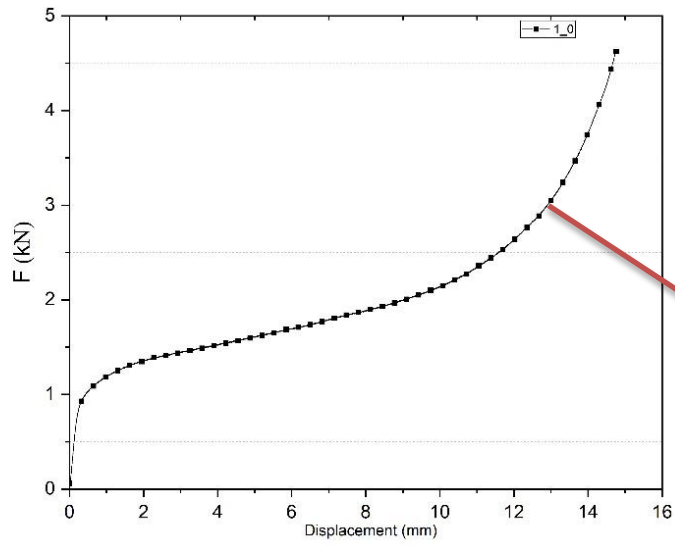
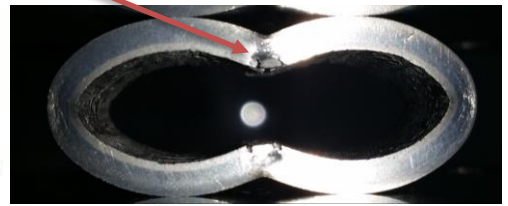
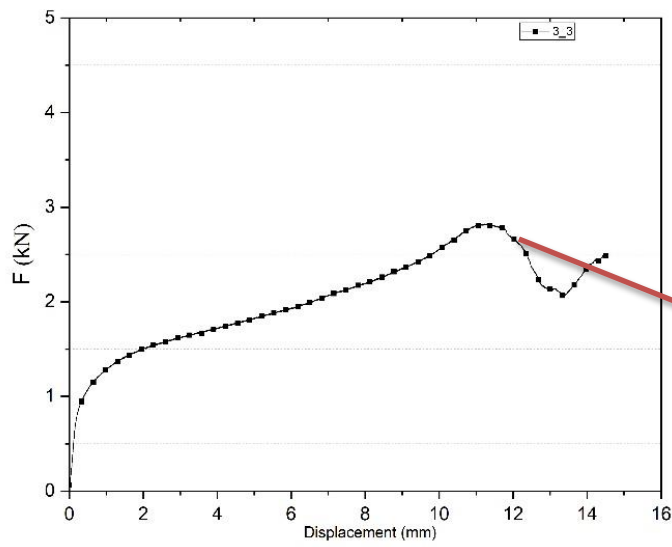


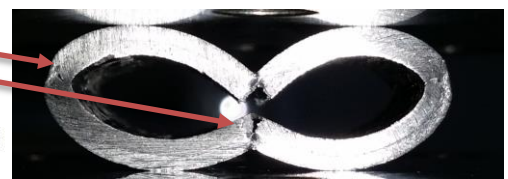
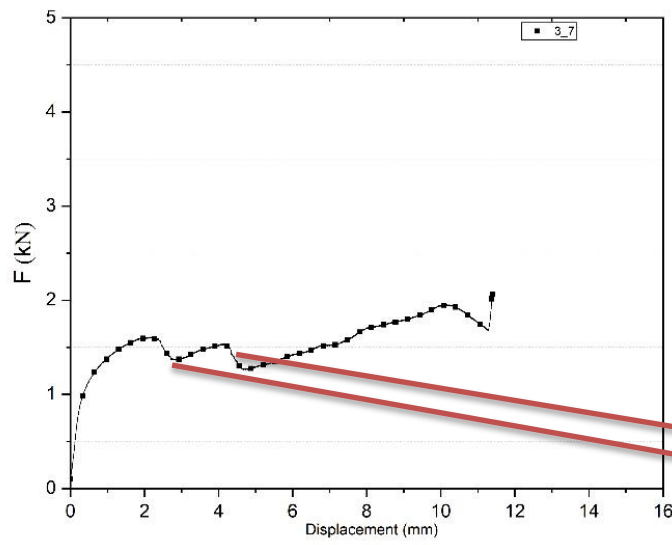
Figure 5. Force-displacement curves obtained from flattening tests, a) with different SiC ratios at 1.5-0.5 mm wall thicknesses, b) with different SiC ratios at 1-1 mm wall thicknesses, c) with different SiC ratios at 0.5-1.5 mm wall thicknesses



a)



b)



c)

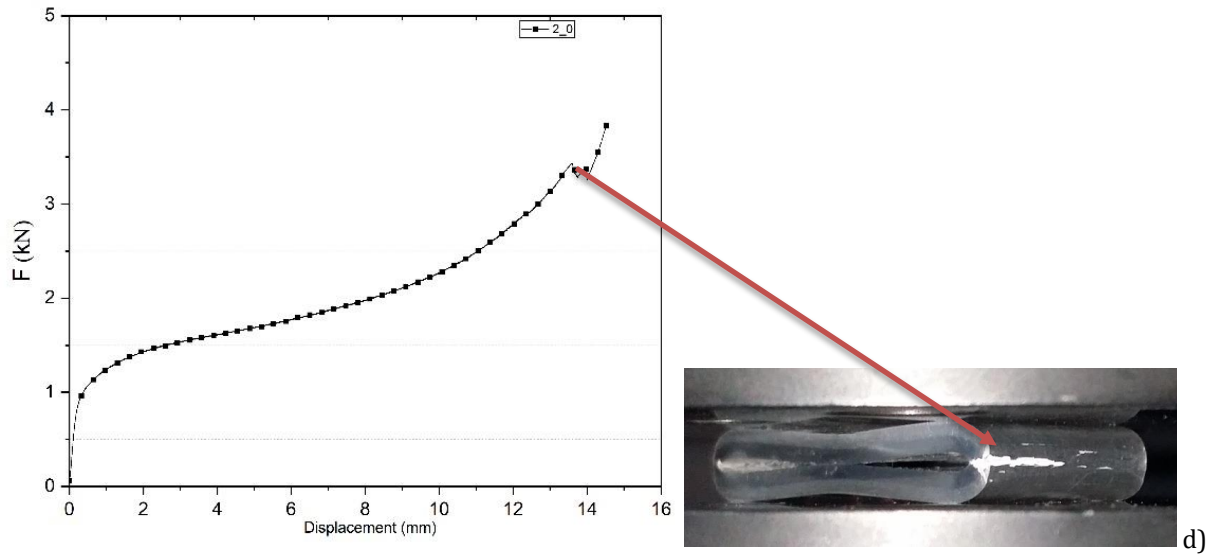


Figure 6. Different failure damage images of composite pipes under flattening tests, a) Al6061-Al2124-(1.5-0.5 mm), b) Al6061-Al2124/SiC (3%)-(0.5-1.5 mm), c) Al6061-Al2124/SiC (7%)-(0.5-1.5 mm), Al6061-Al2124-(1-1 mm)

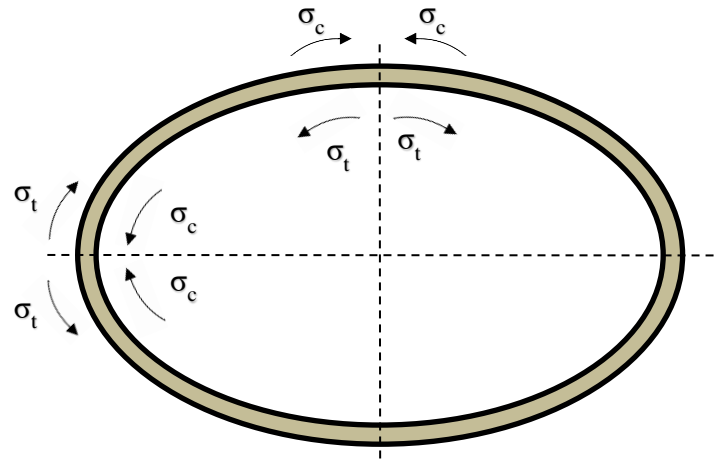


Figure 7. Stress zones and types that occur during the flattening test in pipes (σ_c =compression stress, σ_t =tensile stress) [23]

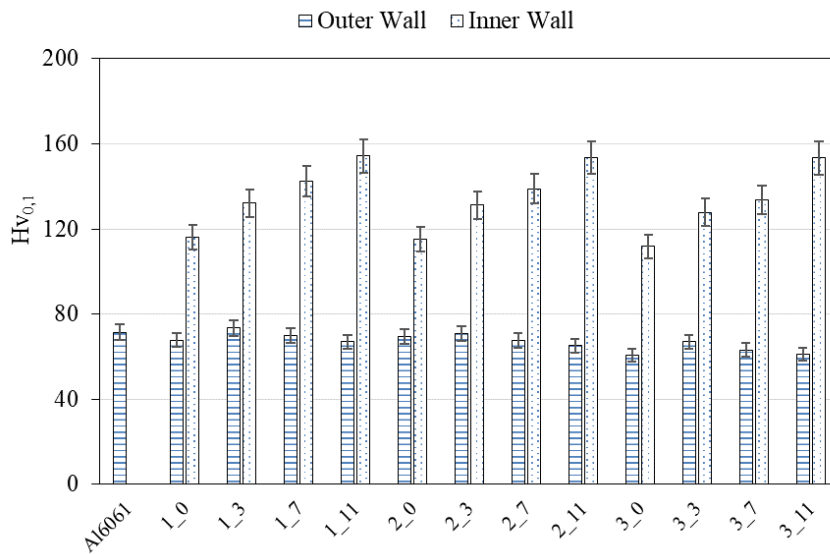


Figure 8. Hardness values of inner and outer walls of composite materials

Different mechanical behaviors were observed as the wall thickness varied while keeping the material content constant. In Al6061-Al2124 materials, flattening resistance increased with the increase in the thickness of the inner wall. While no failure damage was observed in the material with the thinnest inner wall, failures were observed on the outer walls of materials with medium and thick inner walls at the end of the flattening test. In materials containing SiC reinforcement, the flattening resistance, which increased when passing from the thin inner wall to the middle inner wall, decreased again at the thickest inner wall. It was observed that as the thickness of the inner wall increased in three different SiC reinforcement ratios, plastic deformation rates decreased, and the frequency of single or multiple damages increased. When looking at the damage types, damages were seen in the middle regions of materials that had SiC reinforcement as 3%. In the thin inner-walled materials containing 7% and 11% SiC, damage was seen only in the middle regions. In other wall thicknesses, damage was seen in both the middle and lateral regions. Also, when the SiC ratio increased in materials, the force and displacement values of damage decreased. This also indicates that the material loses its deformation ability, that is, its toughness, with the increase in SiC ratio [24, 25].

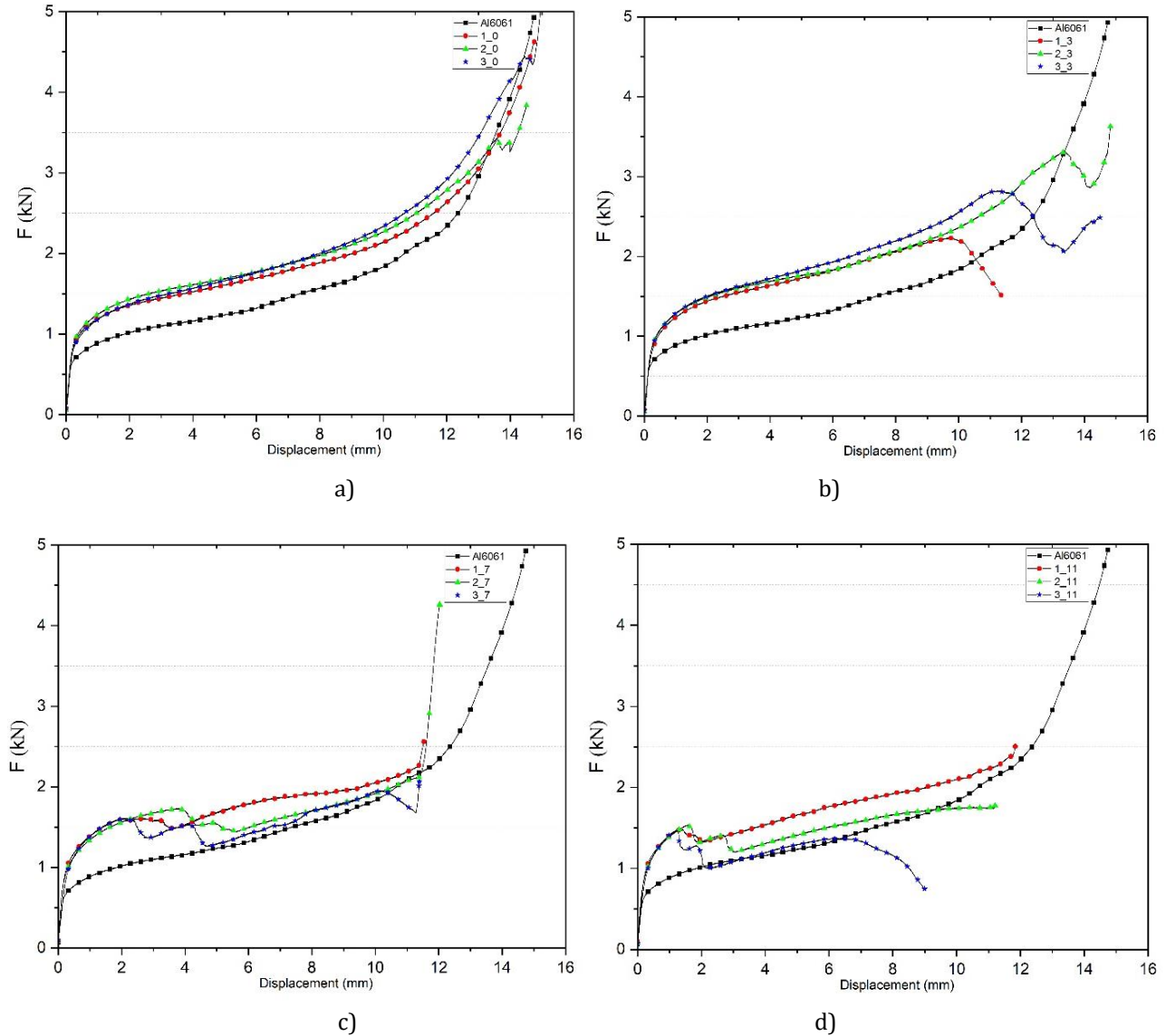


Figure 9. Force-displacement curves obtained from flattening tests, a) Al6061-Al2124 pipes with different wall thicknesses, b) Different wall thicknesses with 3% SiC ratio, c) Different wall thicknesses with 7% SiC ratio, d) Different wall thicknesses with 11% SiC ratio

4. Discussion and Conclusion

This study focused on producing double-walled composite pipes. Their mechanical properties were examined with flattening tests under radial forces. The inner and outer wall thicknesses of the materials and the SiC reinforcement ratio in the inner wall were production variables. Wall thicknesses were adjusted at three different rates as 1.5-0.5, 1-1, and 0.5-1.5 mm. SiC reinforcement was applied as 3, 7, and 11%. Composite pipes were produced by the mandrel-assisted extrusion method. When Al6061 material was double-walled with Al2124 in the inner wall, the flattening resistance increased. In addition, the flattening resistance increased with SiC reinforcement and the increase of the reinforcement ratio. With the increase in flattening resistance, failure damages were observed in all Al6061-Al2124 and Al6061-Al2124/SiC materials, where the inner wall was the thickest. The displacement and force values that caused failure damage decreased with increasing of inner wall thickness and reinforcement ratio of SiC. Failure damages occurred firstly at the upper and lower parts of the materials. These damages were encountered in both the middle and lateral regions of the materials where the inner wall was thicker and the SiC reinforcement ratio was 7% and 11%.

Acknowledgement

This study was supported by the Erciyes University Scientific Research Projects Unit with the project code FYL-2020-10147.

References

- [1] Salur, E., Acarer, M., Şavklıyıldız, İ. Improving mechanical properties of nano-sized TiC particle reinforced AA7075 Al alloy composites produced by ball milling and hot pressing. *Materials Today Communications*, 27(2021), 1–17.
- [2] Karabulut, Ş., Gökmen, U., Çinici, H. Study on the mechanical and drilling properties of AA7039 composites reinforced with Al₂O₃/B₄C/SiC particles. *Composites Part B: Engineering*, 93(2016), 43–55.
- [3] Yuan, L., Han, J., Liu, J., Jiang, Z. Mechanical properties and tribological behavior of aluminum matrix composites reinforced with in-situ AlB₂ particles. *Tribology International*, 98(2016), 41–47.
- [4] Zhang, H., Zhao, Y., Yan, Y., Fan, J., Wang, L., Dong, H., Xu, B. Microstructure evolution and mechanical properties of Mg matrix composites reinforced with Al and nano SiC particles using spark plasma sintering followed by hot extrusion. *Journal of Alloys and Compounds*, 725(2017), 652–664.
- [5] Li, X., Yan, S., Chen, X., Hong, Q., Wang, N. Microstructure and mechanical properties of graphene-reinforced copper matrix composites prepared by in-situ CVD, ball-milling, and spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 834(2020), 155-182.
- [6] Wang, Z., Song, M., Sun, C., He, Y. Effects of particle size and distribution on the mechanical properties of SiC reinforced Al-Cu alloy composites. *Materials Science and Engineering: A*, 528(2011), 1131–1137.
- [7] Wang, X., Zhao, J., Cui, E., Song, S., Liu, H., Song, W. Microstructure, mechanical properties and toughening mechanisms of graphene reinforced Al₂O₃-WC-TiC composite ceramic tool material. *Ceramics International*, 45(2019), 10321–10329.
- [8] Ferraris, M., Gili, F., Lizarralde, X., Igartua, A., Mendoza, G., Blugan, G., Gorjan, L., Casalegno, V. SiC particle reinforced Al matrix composites brazed on aluminum body for lightweight wear resistant brakes. *Ceramics International*, 48(2022), 10941–10951.
- [9] Sergi, A., Khan, R.H.U., Irukuvarghula, S., Meisnar, M., Makaya, A., Attallah, M.M. Development of Ni-base metal matrix composites by powder metallurgy hot isostatic pressing for space applications. *Advanced Powder Technology*, 33(2022), 103411.
- [10] Dyzia, M. Aluminum matrix composite (AlSi7Mg2Sr0.03/SiCp) pistons obtained by mechanical mixing method. *Materials*, 11(2017), 1-8.
- [11] Mahmoodi, M., Tahmasbi, K., Zaroodi, M. Microstructure and Mechanical Characterization of Al-SiC MMC Tube Produced via Friction Stir Back Extrusion. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(2021), 2609–2620.
- [12] Canakci, A., Arslan, F. Abrasive wear behaviour of B₄C particle reinforced Al₂O₃ MMCs. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(2012), 785–795.
- [13] Dwivedi, S.P. Microstructure and mechanical behaviour of Al/B₄C metal matrix composite. *Materials Today: Proceedings*, 25(2019), 751–754.
- [14] Kirmızı, G., Arık, H., Çinici, H. Experimental study on mechanical and ballistic behaviours of silicon carbide reinforced functionally graded aluminum foam composites. *Composites Part B: Engineering*, 164(2019), 345–357.
- [15] Karabulut, Ş., Karakoç, H., Bilgin, M., Canpolat, H., Krolczyk, G.M., Sarıkaya, M. A comparative study on mechanical and ballistic performance of functionally graded Al6061 composites reinforced with B₄C, SiC, and

- Al2O3. *Journal of Materials Research and Technology*, 23(2023), 5050–5065.
- [16] Xunzhong, G., Jie, Tao, Wentao, W., Huaguan, L., Chen, W. Effects of the inner mould material on the aluminium–316L stainless steel explosive clad pipe. *Materials and Design*, 49(2013), 116-122.
- [17] Yu, H., Fan, Z., Li, Magnetic pulse cladding of aluminum alloy on mild steel tube. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(2014), 141-150.
- [18] Chitkara, N. R., Aleem, A. Extrusion of axi-symmetric bi-metallic tubes: some experiments using hollow billets and the application of a generalised slab method of analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(2001) 2857-2882.
- [19] Wang, Y., Yang, G., Lei, X., Li, Q., Rong, L., Hu, X., Wei, Y. Metal ductility evaluation by flattening test: The geometry dependence. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 170(2019), 40–48.
- [20] Ma, Q-hua, Dong, F., Gan, X- hui, Zhou, T. Effects of different interface conditions on energy absorption characteristics of Al/carbon fiber reinforced polymer hybrid structures for multiple loading conditions. *Polymer Composites*, 42(2021), 2838–2863.
- [21] Strodick, S., Schmidt, R., Gerdes, L., Zabel, A., Biermann, D., Walther, F. Impact of cutting parameters on the mechanical properties of BTA deep drilled components under quasi-static compression. *Procedia CIRP*, 103(2021), 207–212.
- [22] Dharshan, K., Raju, T.N., Nagaral, M., Bharath, V., Auradi, V., Shantharaj, P., Supreeth, S. Microstructure, tensile and impact behaviour of Si3N4particles reinforced Al2O24 matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 52(2022), 1499–1503.
- [23] Zha, Y., Ma, Q., Gan, X., Cai, M., Zhou, T. Deformation and energy absorption characters of Al-CFRP hybrid tubes under quasi-static radial compression. *Polymer Composites*, 41(2020), 4602–4618.
- [24] Dwivedi, S. P. Microstructure and mechanical behaviour of Al/B4C metal matrix composite. *Materials Today: Proceedings*, 25(2020), 751-754.
- [25] Lin, C., Wang, S., Yan, H., Han, Y., Zhu, J., Shi, H. Optimization Mechanisms of Microstructure and Mechanical Properties of SiC Fiber Reinforced Ti/Al3Ti Laminated Composite Synthesized Using Titanium Barrier. *Metals and Materials International*, 27(2021), 306-318.

Düz bir Yüzeve Sürekli ve Eşzamanlı Olarak Çarpan Halkasal ve Dairesel Jetin Isı Transfer Karakteristiklerinin Sayısal Analizi

Necati Ün¹ , Selma Akçay^{*2} , Ünal Akdağ³ 

¹ Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD, AKSARAY

^{*2} Çankırı Karatekin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, ÇANKIRI,

³Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, AKSARAY

(Alınış / Received: 08.12.2023, Kabul / Accepted: 04.03.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

Anahtar Kelimeler

Halkasal Jet,
Dairesel Jet,
Jet Çarpması,
Düz Hedef Yüzeve,
Isı Transferi İyileştirme

Öz: Bu çalışmada, izotermal olarak ısıtılmış düz bir yüzeve üzerine sürekli ve eşzamanlı olarak çarpan halkasal ve dairesel jetin ısı transfer karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma, ANSYS Fluent yazılımı ile RNG k-ε türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İncelemeler, hedef yüzeve ile jet çıkışı arasındaki iki farklı çarpma mesafesinde (H/D: 2 ve 4) gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda, dairesel ve halkasal jetin Reynolds sayıları için $3000 \leq Re \leq 15000$ aralığındaki farklı kombinasyonları uygulanmıştır. Prandtl sayısı (Pr) ve diğer geometrik parametreler sabit tutulmuştur. Halkasal jet ve dairesel jetin eşzamanlı olarak farklı Reynolds sayılarının kombinasyonlarında hedef yüzeve üzerine çarpması sonucu yüzevedeki Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Farklı jet hızları ve H/D mesafeleri için çözüm alanında elde edilen hız ve sıcaklık dağılımları sunulmuştur. Sayısal sonuçlar, dairesel ve eşzamanlı jetin yüzeve üzerine sürekli ve eş zamanlı uygulanmasının sadece dairesel ve sadece halkasal jet çarpmasına göre ısı transferi iyileştirmede önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Jet-hedef yüzeve arasındaki mesafenin azalması, ısı transferinin artmasına neden olmuştur. En iyi ısı transferi H/D=2 mesafesinde $Re_{dış}=15000$ ve $Re_{iç}=15000$ kombinasyonunda $Nu=374,85$ olarak elde edilmiştir.

Numerical Analysis of Heat Transfer Characteristics of Continuously and Simultaneously Annular and Circular Jet Impinging on a Flat Surface

Keywords

Annular Jet,
Circular Jet,
Jet Impingement,
Flat Target Surface,
Heat Transfer Enhancement

Abstract: In this study, the heat transfer characteristics of annular and annular jets continuously and simultaneously impinging on an isothermally heated flat surface were numerically investigated. The study was carried out using the RNG k-ε turbulence model with ANSYS Fluent software. Examinations were conducted at two different impact distances (H/D: 2 and 4) between the target surface and the jet exit. In the simulations, different combinations were applied for the Reynolds numbers of the circular and annular jet in the range of $3000 \leq Re \leq 15000$. Prandtl number (Pr) and other geometric parameters were kept constant. Nusselt numbers on the surface were calculated as a result of the annular jet and the circular jet impinging the target surface simultaneously at different combinations of Reynolds numbers. The velocity and temperature distributions obtained in the solution domain for different jet velocities and H/D distances were presented. The numerical results showed that the continuous and simultaneous application of circular and annular jet on the surface has a significant effect on heat transfer improvement compared to only circular and only annular jet impingement. The decrease in the distance between the jet and the target surface caused an increase in heat transfer. The best heat transfer was obtained as $Nu=374.85$ in the combination of $Re_{iç} = 15000$ and $Re_{dış} = 15000$ at H/D = 2 distance.

*İlgili Yazar, email: selmaakcay@karatekin.edu.tr

1. Giriş

Endüstride ısıtma, soğutma ve kurutma gibi mühendislik uygulamalarında ısı transferini artırmak amacıyla farklı yöntemler araştırılmaktadır. Bu yöntemlerden çarpan jet uygulamaları, ısı transfer kapasitesini artırmada yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 2]. Çarpan jetler, gaz türbini kanatlarının ve elektronik devre elemanlarının soğutulması, tekstil, kâğıt, cam, gıda ve kimya endüstrileri, metallerin tavllanması gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu nedenle, çarpan jetler, son yıllarda deneysel ve sayısal araştırmaların ilgi odağı olmuştur [3, 4]. Çarpan jet akışı, bir lüle veya kanaldan geçirilen yüksek hızlı bir akışkanın hedef yüzey üzerine püskürtülmesi ile elde edilen akış biçimi olarak tanımlanır [5]. Çarpan jetin çalışma prensibi hedef yüzey üzerinde oluşan termal sınır tabakayı dağıtarak veya incelterek ısı transferini artırma esasına dayanmaktadır. Çarpan jette, akışkan ile hedef yüzey arasında yüksek yerel ısı transfer katsayısı elde edilmesi sonucu, çarpma yüzeyinde ısı ve kütle aktarımı sağlanır. Ayrıca yüksek ısı transferi elde edilirken daha düşük akışkan miktarları kullanılması nedeniyle enerji tasarrufuna önemli katkı sağlamaktadır [5]. Çarpan jetlerin akış ve ısı transferi özellikleri, jet çıkış geometrisi, jet hızı, jet ile hedef yüzey arasındaki mesafe, jetin laminar ya da türbülanslı olması, hedef yüzey geometrisi, jet ile hedef yüzey arasındaki sıcaklık farkı, akışkan tipi gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir [5].

Literatürde sürekli çarpan jet akışları ile ilgili pek çok deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir [1, 6, 7]. Bu çalışmalardan bazıları jet geometrisine odaklanmıştır. Lee ve Lee [8] farklı en boy oranlarına sahip elips şeklindeki çarpan jetin hedef yüzey üzerindeki ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Lüle ile plaka mesafesinin $L/D > 6$ olduğu durum dikkate alındığında, eliptik çarpan jetin dairesel çarpan jete göre daha az ısı transferi sağladığını belirterek eliptik jetlerin ısı transferi uygulamalarında kontrol mekanizması olarak kullanılabilirliklerini bildirmişlerdir. Yasaswy vd. [9] kare kesitli jet geometrisi kullanarak farklı Reynolds sayıları ($6000 \leq Re \leq 12000$) ve farklı nozul-hedef yüzey mesafeleri için ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Kılıç ve Başkaya [10] farklı geometride (kare, üçgen ve silindir) akış yönlendiricileri kullanarak farklı Reynolds sayıları ($8000 \leq Re \leq 43000$) ve H/D_h parametreleri için çarpan jetin ısı transferini araştırmışlar ve üçgen akış yönlendiricinin, diğer akış yönlendiricilere göre daha yüksek ısı transferi sağladığını bildirmişlerdir. Alnak ve Karabulut [11] farklı geometriye sahip nozul kullanarak gıdaların saklama koşullarının iyileştirilmesi üzerine sayısal ve deneysel bir çalışma yapmışlardır. Laminar hava akışıyla birlikte çarpma bölgesindeki nesneye ısı transferi sağlanarak depolama durumlarında minimum nemlilik oranı elde edilebileceğini bildirmişlerdir. Ayrıca en fazla jet kurutmanın durma noktası bölgesinde olduğunu rapor etmişlerdir. Golda vd. [12] deneysel çalışmalarında dairesel ve silindirik geometriye sahip lüleler kullanarak çarpan jet üzerine araştırma yapmışlardır. Zhong vd. [13] farklı nozul modelleri kullanarak halkasal çarpan jetin ısı transfer karakteristiklerini $5000 \leq Re \leq 40000$ aralığındaki Reynolds sayıları ve farklı jet-hedef yüzey arası mesafeler (H/D : 0.5, 2, ve 4) için sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, nozul geometrisinin ısı transferini etkilediğini bildirerek Nusselt sayısı ile Reynolds sayısı arasında bir korelasyon önermişlerdir.

Bazı araştırmacılar halkasal çarpan jetlerin ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir [14, 15]. Philippov vd. [15] $Re=5500$ için türbülanslı halkasal çarpan jetin farklı lüle-hedef yüzey mesafelerinde soğutma etkisini araştırmışlardır. Halkasal jetin iç çapı 3 mm ve dış çapı 22 mm, halkasal lüle ile çarpma yüzeyi arası mesafesi için 0.5, 1, 1.5 değerlerini dikkate alarak halkasal çarpan jetin aerodinamik hareketlerini incelemişlerdir. Çelik [16] ısı transferi açısından en uygun lüle tipini belirlemek için farklı Reynolds sayıları ve jet ile plaka arası mesafeler (H/D) için türbülanslı çarpan jet akışını incelemiştir. Çalışma sonucunda, eş eksenli halkasal lüle kullanımının düz dairesel lüleye göre daha etkili olduğunu göstermiştir. Kalina vd. [17] halkasal çarpan jet ile ilgili deneysel bir çalışmada, çarpma yüzeyine yakın mesafedeki ısı transferi özelliklerine yoğunlaşmışlardır. Halkasal çarpan jetin kullanılması durumunda dairesel çarpan jete göre daha fazla ısı transferi sağladığını belirtmişlerdir. Markal [18] farklı Reynolds sayılarında (Re : 6688, 9364 ve 12039), lüle-plaka arası uzaklığın 0.8 mm olduğu eş eksenli halkasal ve dairesel çarpan jetin ısı transferi karakteristiklerini incelemiştir. Başka bir çalışmada, Aydın ve Markal [19] eş eksenli ikili halkasal jet akışının hedef yüzeye çarpması sonucu meydana gelen ısı transferini farklı lüle ile plaka mesafeleri (H/D : 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5) için incelemişlerdir. Yüzey ile lüle arası mesafe arttıkça Nusselt sayısının azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca ikili halkasal jet kullanımının ısı transferi yoğunluğu ve homojenliği açısından tek halkasal çarpan jetten daha avantajlı olduğunu bildirmişlerdir. Terekhov vd. [20] jet Reynolds sayıları ($12000 \leq Re \leq 36000$), lüle-çarpma yüzeyi mesafeleri (H/D : 2, 4 ve 6) ile iç ve dış lüle çapları değiştirilerek halkasal çarpan jet akışını deneysel olarak incelemişlerdir. En yüksek ısı transferinin $H/D=2$ 'de elde edildiğini belirterek yüzey üzerindeki ısı transferinin %70'e yakın iyileştirdiğini göstermişlerdir. Afroz ve Sharif [21] izotermal olarak ısıtılmış düz bir yüzey üzerine dış çapı 30 mm olan halkasal çarpan jet akışının farklı Reynolds sayılarında ($5000 \leq Re \leq 35000$) ve farklı jet-hedef yüzey arası mesafeler için ($0.3 \leq H/D \leq 4$) ısı transferini sayısal olarak araştırmışlardır. Tüm Reynolds sayılarında H/D mesafesinin azalması ile Nusselt sayısının arttığını ve maksimum ısı transferinin $H/D=0,4$ olduğu durumda meydana geldiğini bildirmişlerdir. İbrahimov [22] eş eksenli iki farklı

halkasal lüle kullanarak farklı Reynolds sayıları ve farklı mesafelerde ($H/D=0.5, 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$) çarpan jetlerin ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Reynolds sayısı arttıkça Nusselt sayısının da arttığını ve hedef yüzey üzerinde en iyi ısı transferinin $H/D=1$ durumda sağlandığını belirtmişlerdir. Eş eksenli ikili halkasal jetin kullanılması, tekli halkasal jete göre daha iyi ısı transferi sağladığını bildirmişlerdir. Dutta ve Chattopadhyay [23] jet-hedef yüzey mesafesinin $H/D=2$ olduğu durumda, halkasal jet akışında $10000 \leq Re \leq 50000$ aralığındaki Reynolds sayılarında ısı transferini araştırmışlar ve Reynolds sayısının artmasıyla çarpma bölgesinde Nusselt sayısının da arttığını bildirmişlerdir. Fenot vd. [24] çarpan halkasal jetlerin ısı transferi karakteristiklerini $D_{iç}/D_{dış}$ oranına göre incelemişler ve iç çapın dış çapa oranının artması ile yüzey üzerindeki ısı transferinin arttığını tespit etmişlerdir. Kılıç vd. [25] dönen jetler kullanarak endüstriyel bir silindirin soğutulmasını, farklı Reynolds sayıları ($1000 \leq Re \leq 1700$), farklı ısı akıları ($5000-12500 \text{ W/m}^2$) ve akışkanın farklı giriş sıcaklıkları ($5-25^\circ\text{C}$) için sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, $Re=1700$ 'de silindirin iç ve dış yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının $Re=1000$ değerine göre %45,4 azaldığını, ısı akısının 12500 W/m^2 olması halinde sıcaklık farkının 5000 W/m^2 değerine göre %149,4 oranında arttığını ve akışkanın giriş sıcaklığındaki artışın yüzey sıcaklığını da artırdığını bildirmişlerdir.

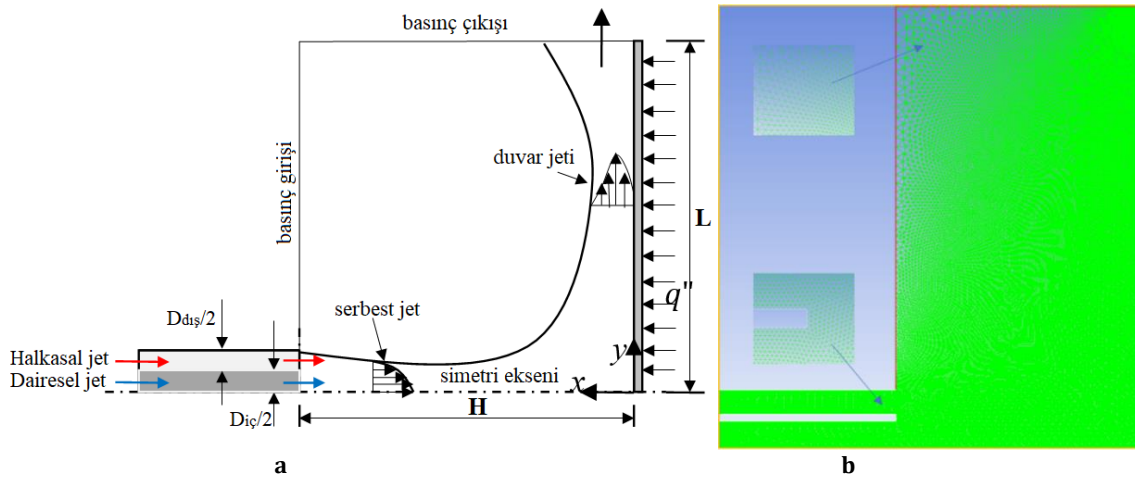
Literatür araştırmasına göre, sayısal ve deneysel araştırmalarla sürekli çarpan jetlerin ısı transferini artırdığı kanıtlanmıştır. Önceki çalışmalardan bazıları ısı transferi üzerinde jet geometrisinin etkilerini incelemişler, bazıları ise halkasal jetler üzerine odaklanmıştır. Bugüne kadar sürekli ve eş zamanlı olarak çarpan dairesel ve halkasal jetlerin farklı Reynolds sayıları kombinasyonlarında hedef yüzey üzerindeki ısı transferinin araştırılmadığı görülmektedir. Bu nedenle, bu çalışma düz bir hedef yüzey üzerindeki ısı transferini iyileştirmek amacıyla iç içe geçmiş eş eksenli halkasal ve dairesel jetin sürekli ve eş zamanlı olarak hedef yüzey üzerine çarpması sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, iki farklı jet-hedef yüzey mesafelerinin ($H/D: 2$ ve 4) ve halkasal ve dairesel jet için farklı Reynolds sayılarının kombinasyonlarının yüzey soğutmadaki etkinliği araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metod

2.1. Sayısal model

Çalışmada kullanılan sayısal modelin $H/D=2$ için iki boyutlu şematığı ve ağ yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir. Jet çıkış geometrisi olarak iç içe geçmiş eş eksenli halkasal ve dairesel geometriden oluşan lüle tasarımı kullanılmıştır. Kullanılan dairesel lülenin çapı ($D_{iç}$) 19 mm, halkasal lülenin dış çapı ($D_{dış}$) 41 mm olup dairesel ve halkasal lüle arasında $t=2$ mm et kalınlığı mevcuttur. Lüle çıkışı ile hedef yüzey arasındaki mesafe (H/D) için 2 ve 4 olarak iki farklı değer alınmıştır. Hedef yüzey, uzunluğu ($2L$) 300 mm olan düz bir levhadır.

Sayısal çalışma, türbülanslı akış koşullarında gerçekleştirilmiştir. Sürekli dairesel ve halkasal çarpan jetin eş zamanlı farklı Reynolds sayılarındaki kombinasyonlarının hedef yüzey soğutmadaki etkilerini gözlemleyebilmek için analizler $3000 \leq Re \leq 15000$ aralığındaki Reynolds sayılarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. a) Sayısal modelin 2d şematığı, b) $H/D=2$ için çözüm alanının ağ yapısı

2.2. Korunum denklemleri

Sayısal çalışmada, jet akışkanı havadır. Akışkanın ideal gaz olduğu, fiziksel özelliklerinin değişmediği kabul edilmiştir. Jet akışı, sürekli şartlarda türbülanslı rejim altında hedef yüzeye çarpmaktadır. Hedef yüzeyle çevre arasında ısı ışınım ihmal edilmiştir. Yerçekimi gibi gövde kuvvetlerinin etkisi hesaplamaya dahil edilmemiştir. Viskoz yayılım etkisi ihmal edilerek korunum denklemleri Eşitlik 1-3'te verilmiştir.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2)$$

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(u_i T)}{\partial x_i} \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{u'_i T'} \right) \quad (3)$$

Burada u, v sırasıyla x, y yönündeki hız bileşenlerini göstermektedir. Sıcaklık T ve dinamik basınç p ile gösterilmiştir. Matematiksel formülde u', T' vb. terimler türbülans gerilmelerini, ρ yoğunluk, c_p özgül ısı ve k ise ısı iletim katsayısını göstermektedir.

Literatürde çarpan jet akışları için RNG $k-\varepsilon$ türbülans modeli sıklıkla kullanılmıştır. Türbülanslı halkasal çarpan jet akışlarında bu modelin başarılı ve hızlı sonuçlar verdiği belirtilmiştir [21, 26]. Bu nedenle, sayısal çalışmada viskoz model olarak RNG $k-\varepsilon$ türbülans modeli seçilmiştir.

2.3 Akış ve ısı transfer hesaplamaları

Bu çalışmada, jet Reynolds sayısı, akışın karakteristiğini belirleyen önemli bir parametredir. Çalışmada dairesel ve halkasal jet için farklı Reynolds sayısı tanımlanmıştır. $Re_{iç}$ dairesel jete ait Reynolds sayısını (Eşitlik 4), $Re_{dış}$ halkasal jete ait Reynolds sayısını (Eşitlik 5) temsil etmektedir.

$$Re_{iç} = \frac{(U_{j,d})(D_{h,dairesel})}{\nu} \quad (4)$$

$$Re_{dış} = \frac{(U_{j,h})(D_{h,halkasal})}{\nu} \quad (5)$$

Burada $D_{h,dairesel}$ ve $D_{h,halkasal}$ sırasıyla dairesel ve halkasal jetin hidrolik çaplarını göstermektedir. $U_{j,d}$ ve $U_{j,h}$ ise sırasıyla dairesel ve halkasal jet çıkış hızlarıdır, ν kinematik viskoziteyi gösterir.

Jet akışında, hedef yüzeyde elde edilen ısı transferi, ortalama Nusselt sayısı (Nu_{ort}) ile hesaplanmaktadır (Eşitlik 6).

$$Nu_{ort} = \frac{hL}{k} \quad (6)$$

Burada L hedef yüzeyin karakteristik uzunluğunun, k akışkanın ısı iletim katsayısını ve h ise ısı taşınım katsayısını göstermektedir.

Isı taşınım katsayısı (h) Eşitlik (7) ile elde edilmektedir.

$$h = \frac{q''}{(T_s - T_\infty)} \quad (7)$$

Burada q'' hedef yüzeye uygulanan ısı akısını, T_s ve T_∞ ise sırasıyla hedef yüzeyin sıcaklığını ve ortam sıcaklığı göstermektedir.

Jet-hedef yüzey arasındaki mesafe H olmak üzere boyutsuz mesafe (B) Eşitlik 8 ile tanımlanmıştır.

$$B = \frac{H}{D} \quad (8)$$

2.4 Sayısal yöntem ve sınır şartları

Bu çalışmada, sayısal çözüm alanının oluşturulması ve hücelere bölünmesi GAMBİT yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Homojen dağılım elde etmek için üçgen ağ yapısı kullanılmış olup çözüm alanına ait ağ yapısı Şekil 1b'de gösterilmiştir. Yapılandırılmamış üçgen ağ yapısı, sınır tabakada daha sık olmak üzere, uzaklaşan bölgelerde sıklığı azalacak şekilde oluşturulmuştur (Şekil 1b). Lüle girişinde ve sınır tabakada, çok daha ince ağ yapısı kullanılmıştır. Çalışmada, çözümlerin hücre sayısından etkilenmediği ağ yapısını belirlemek için ağ bağımsızlık testi uygulanmıştır. Bunun için $Re_{iç}=15000$ ve $H/D=2$ parametrelerinde dairesel jet kullanılarak farklı eleman sayılarında Nusselt sayıları hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur. 77.315 eleman sayısından

sonra Nusselt sayısının değişiminin oldukça düşük (%2) olmasından dolayı çözüm alanına 77.315 eleman sayıları uyarlanmıştır.

Tablo. 1 Eleman sayıları ile Nusselt sayılarının değişimi ($Re=15000$, $H/D=2$, dairesel jet)

Eleman sayısı	Nusselt sayısı	Değişim
12.426	201,846	-
49.300	212,521	0,050
77.315	212,932	0,020
118.630	218,123	0,005

Sayısal analizler, sonlu hacim metoduna göre çözüm yapan FLUENT (16.0) yazılımı ile çözülmüştür. Çözümlerde, ayrık çözüm algoritması kullanılmıştır. Basınç ve momentum denklemleri ikinci dereceden ileri fark şeması ile ayrıştırılmıştır. Hız ve basınç arasındaki bağıntı için SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritması kullanılmıştır. Eşitliklerin çözümünde, ardışık iki iterasyon arasında bağıl hatanın azalmasıyla birlikte çözümler yakınsamaktadır. Bu çalışmada yakınsama kriteri olarak enerji denklemi için 10^{-9} momentum ve kütle korunum denklemleri için ise 10^{-6} değeri dikkate alınmıştır.

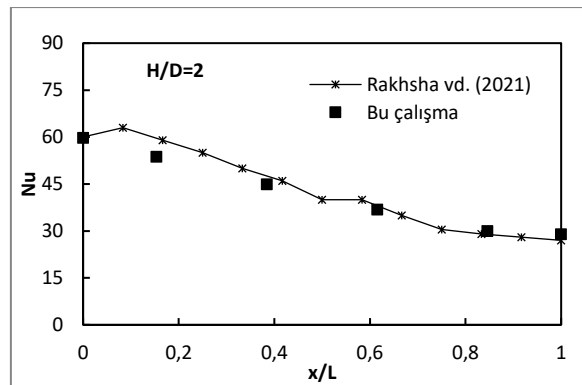
Çözüm alanına uygulanan sınır şartlar Şekil 1a'da ve Tablo 2'de verilmiştir. Dairesel ve halkasal jet girişinde "hız girişi" sınır şartı tariflenmiştir. Dairesel ve halkasal jet için farklı Reynolds sayılarının kombinasyonları uygulanmıştır. $Re_{iç}$ dairesel jet hızını ve $Re_{dış}$ halkasal jet hızını temsil eden Reynolds sayılarını ifade etmektedir. İki boyutlu çalışmada, akışın aksel simetrik olması nedeniyle, eşitlikler aksel simetrik şartlarında çözülmüştür. Düz hedef yüzey üzerine "sabit ısı akısı" uygulanmıştır. Tüm hesaplamalarda, hedef yüzey $q'' = 1200$ W/m² sabit ısı akısında korunmuştur. Jet çıkışındaki serbest yüzey, "basınç girişi" sınır şartı ile tanımlanmıştır. Duvar jet bölgesi çıkışı için "basınç çıkışı" sınır şartı uygulanmıştır.

Tablo. 2 Sayısal modele uygulanan başlangıç ve sınır şartlar

Geometrik sınırlar	Sınır şartın tanımı
Dairesel jet girişi	Hız giriş sınır şartı ($U=U_{j,d}$ ve $T=T_{\infty}$)
Halkasal jet girişi	Hız giriş sınır şartı ($U=U_{j,h}$, $T=T_{\infty}$)
Hedef yüzey	Sabit ısı akısı ($q''=1200$ W/m ²)
Jet çıkışındaki serbest yüzey	Basınç girişi sınır şartı
Duvar jet bölgesi çıkışı	Basınç çıkışı sınır şartı
Jet-hedef yüzey sınırı	Eksenel simetrik sınır şartı

3. Tartışma ve Sonuçlar

Sayısal çözümlerin doğrulanması için bu çalışma, Rakhsha vd. [27] tarafından gerçekleştirilen çalışma sonuçları ile karşılaştırılmış ve x/L boyunca Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Şekil 2'de her iki çalışmadan elde edilen sonuçların karşılaştırılması verilerek sonuçlar arasındaki uyum gösterilmiştir.



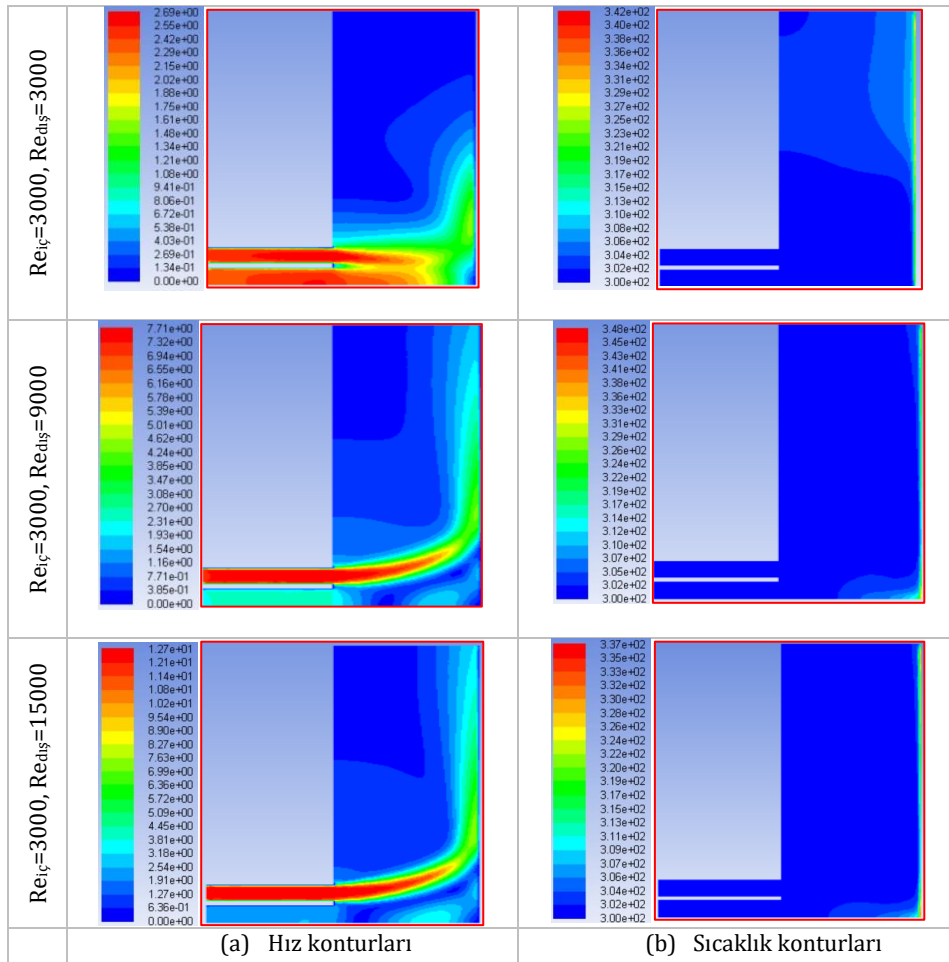
Şekil 2. Sayısal sonuçların doğrulanması

Bu bölümde, iki farklı jet-hedef yüzey mesafesine ve farklı Reynolds sayılarına bağlı olarak sürekli ve eş zamanlı olarak çarpan eş aksel halkasal ve dairesel jetlerden elde edilen Nusselt sayıları elde edilmiştir. Sayısal çözümlerle elde edilen hız ve sıcaklık görüntüleri ile eşzamanlı sürekli çarpan halkasal ve dairesel jetin akış ve ısı transfer mekanizması tartışılmıştır. Yapılan çalışmada ısı akısı, Prandtl sayısı, jet geometrisi sabit tutularak farklı

$Re_{iç}$ (daireysel jet için Re) ve $Re_{dış}$ (halkasal jet için Re) kombinasyonları için akış parametrelerinin ısı transferine etkileri araştırılmıştır.

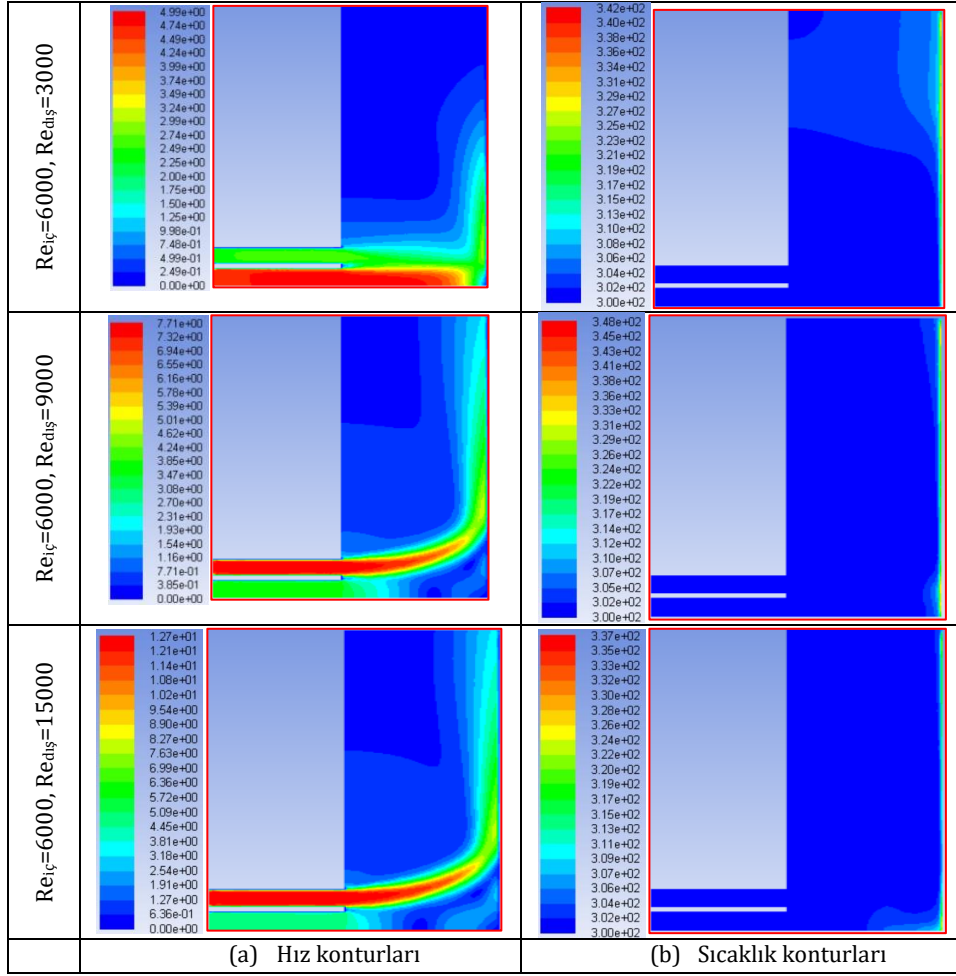
3.1. Jet hızlarının akış ve sıcaklık alanlarına etkisi

Sabit bir jet-hedef yüzey arası mesafede ($H/D=2$) ve sabit bir daireysel jet Reynolds sayısında ($Re_{iç}=3000$) değişen halkasal jet Reynolds sayılarına ($Re_{dış}$) göre akış alanındaki hız alanlarının değişimi Şekil 3a'da ve sıcaklık alanlarının değişimi Şekil 3b'de gösterilmiştir. Halkasal jet hızının düşük olduğu durumda ($Re_{dış}=3000$), jetin hedef yüzeye çarpması ile durma noktası etrafında etkili olduğu ve jetin levha yüzeyine tam olarak yayılmaması nedeniyle duvar jet bölgesinde daha az etkili olduğu görülmektedir. Hedef yüzeye çarptıktan sonra jetin etkisi azalmakta ve levhanın uç kısımlarında önemini kaybetmektedir. Artan $Re_{dış}$ değerlerinde ($Re_{dış} \geq 9000$) ise halkasal jet, durma noktasında daha az etkili olurken, duvar jet bölgesinde jetin önemi artmaktadır (Şekil 3a). Şekil 3b'de düşük $Re_{dış}$ değerlerinde hedef yüzey üzerindeki durma noktasında sıcaklık gradyanı daha düşükken artan $Re_{dış}$ değerlerinde durma noktasındaki sıcaklık gradyanının arttığı gözlenmiştir. Ayrıca $Re_{dış}$ değerinin artması ile hedef yüzey sıcaklığının azaldığı gözlenmektedir. Dairesel ve halkasal jetin, eş zamanlı ve sürekli olarak farklı hızlarda hedef yüzeye çarpması ile hız ve sıcaklık alanlarının oldukça değiştiği görülmektedir. Dairesel ve halkasal jetin eş zamanlı olarak yüzeye çarpması, özellikle halkasal jet hızlarının yüksek olması durumunda tüm levha üzerinde etkili olmasına neden olmuştur.



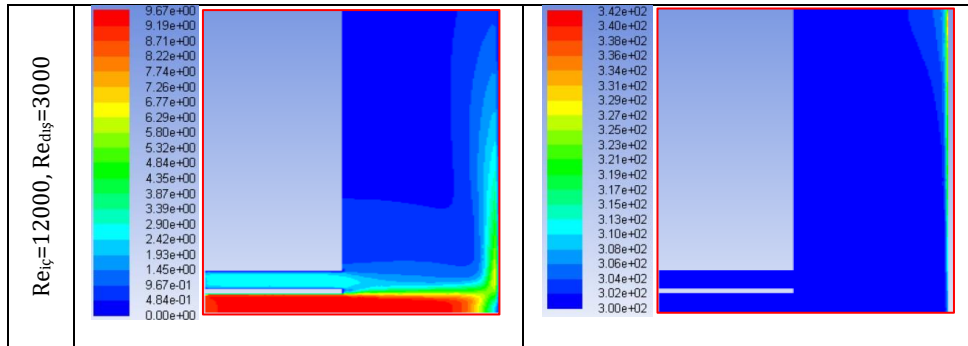
Şekil 3. Sabit $H/D=2$ ve $Re_{iç}=3000$ için farklı $Re_{dış}$ değerlerinde (a) hız alanları ve (b) sıcaklık alanları

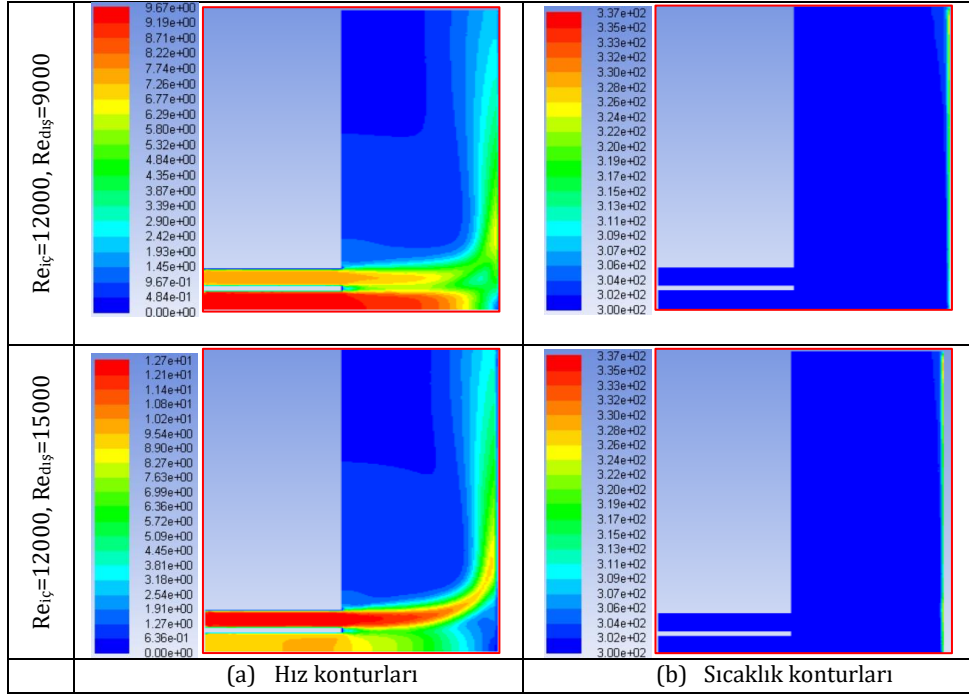
$H/D=2$ ve $Re_{iç}=6000$ olduğu durumda farklı $Re_{dış}$ değerleri için hız alanlarının değişimi Şekil 4a'da ve sıcaklık alanlarının değişimi Şekil 4b'de gösterilmiştir. Şekil 3'te olduğu gibi, Şekil 4'te de daireysel jetin, hedef yüzeye çarptığı durgunluk noktasına yakın bölgelerde etkili olduğu, halkasal jetin ise duvar jeti bölgesinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Dairesel ve halkasal jet hızının artması, levha yüzeyine çarpan akışkanın debisini artırması nedeniyle daha fazla miktardaki akışkanın levha boyunca yayılmasını sağlamaktadır. Her iki jetten çıkan daha soğuk akışkan, ısıtılmış düz hedef yüzey üzerine çarpıp levha boyunca ilerlerken akışkan ve hedef yüzey arasındaki taşınım ile ısı transfer hızını artırmaktadır. Hem daireysel jet hem de halkasal jetin eş zamanlı olarak yüzey üzerine çarpması, yüzeyde oluşan ısıl sınır tabakayı bozarak termal direnci azaltmaktadır. Bu durum akışkan ile levha arasındaki ısı taşınım katsayısının artmasına neden olmaktadır. Böylece ısıtılmış olan hedef yüzeyin sıcaklığında önemli bir düşüş meydana gelecektir.



Şekil 4. $H/D=2$ ve $Re_{iç}=6000$ için farklı $Re_{dış}$ değerlerinde (a) hız alanları ve (b) sıcaklık alanları

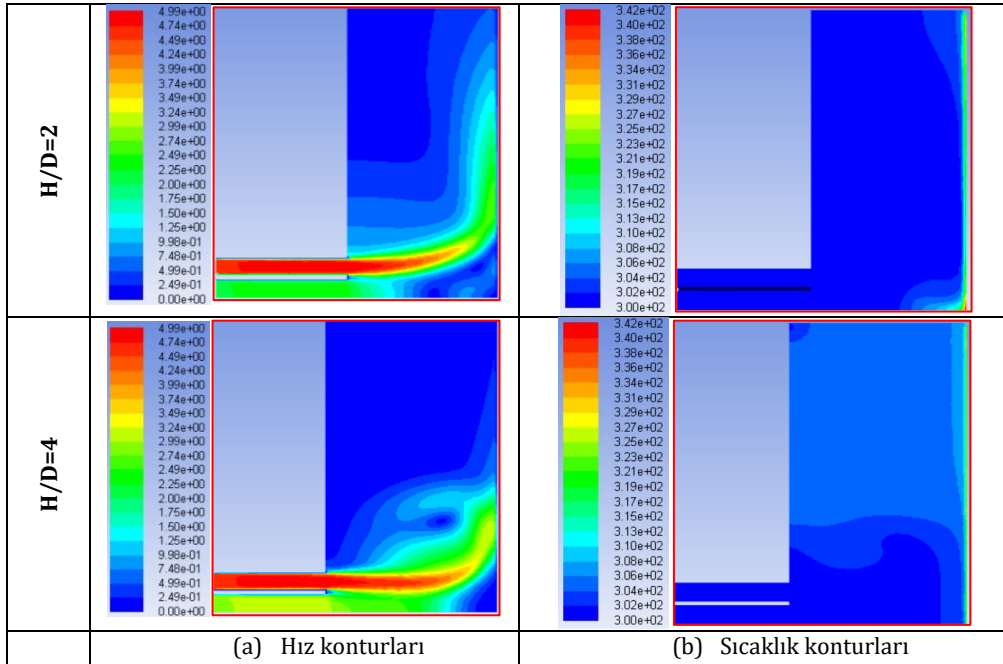
Şekil 5'te, $H/D=2$ ve $Re_{iç}=12000$ olduğu durumda, farklı $Re_{dış}$ değerleri için çözüm alanındaki hız (a) ve sıcaklık (b) dağılımları gösterilmiştir. Daha yüksek dairesel jet hızında, halkasal jet hızının artması levhanın hem durgunluk bölgesinde hem de duvar jeti bölgesindeki akışı indüklemektedir. Dolayısıyla eş zamanlı olarak levha üzerine sürekli çarpan dairesel ve halkasal jetler, tüm levha yüzeyinde etkisini göstermektedir. Şekil 3a ve 4a'da halkasal jetin hedef yüzeye çarpması, belirli bir açı ile durgunluk bölgesinden daha uzakta meydana gelirken Şekil 5a'da daha dik bir açıyla durma bölgesine yakın çarpması dikkat çekmektedir. Jet hızlarının artmasından kaynaklanan bir durumdur. Özellikle $Re_{iç}=12000$ ve $Re_{dış}=15000$ durumunda, yüksek hızlardaki daha soğuk jet akışı, ısıtılmış hedef yüzeye çarptıktan sonra yüzey üzerini tamamen kaplamaktadır. Bu durum ısıtılmış olan hedef yüzeyin sıcaklığının kayda değer şekilde düşmesine yardımcı olmaktadır.



Şekil 5. $H/D=2$ ve $Re_{iç}=12000$ için farklı $Re_{dış}$ değerlerinde (a) hız alanlarının ve (b) sıcaklık alanlarının değişimi

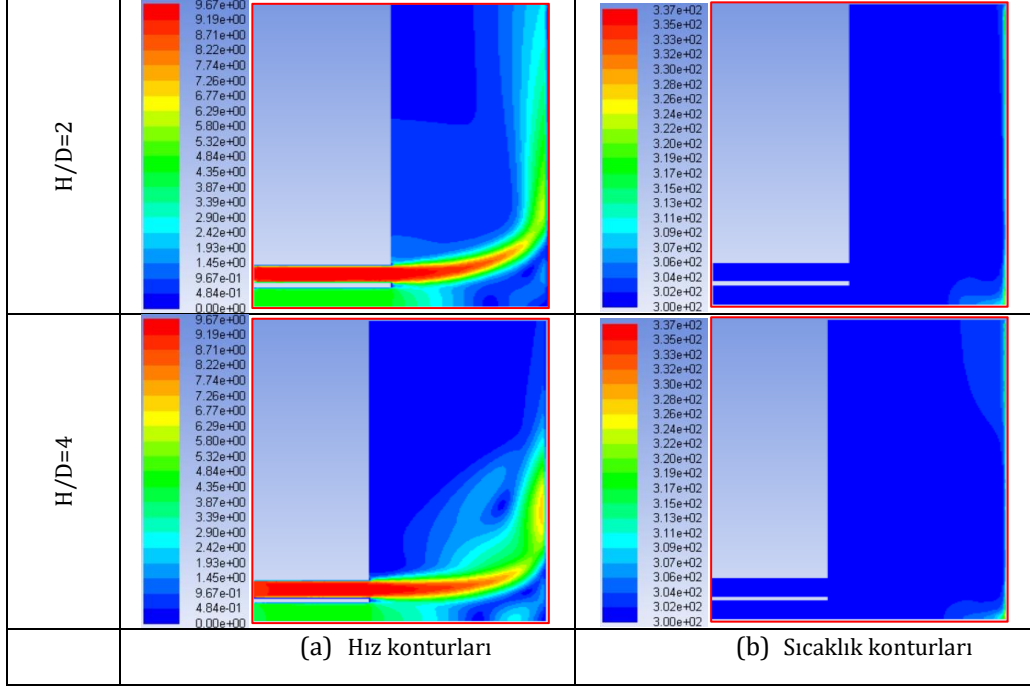
3.2. Jet-hedef yüzey mesafesinin hız ve sıcaklık alanlarına etkisi

Bu bölümde, düz bir hedef yüzeye eşzamanlı ve sürekli olarak çarpan dairesel ve halkasal jetin farklı $Re_{iç}$ ve $Re_{dış}$ değerleri için $H/D=2$ ve $H/D=4$ değerlerinde yüzey üzerindeki akış ve sıcaklık alanları karşılaştırılmıştır. Şekil 6'da $Re_{iç}=3000$ ve $Re_{dış}=6000$ için iki farklı H/D oranlarına göre hız ve sıcaklık alanları verilmiştir. Jetin hedef yüzeye olan mesafesinin azalması ($H/D=2$) akışkanın levha yüzeyine yayılmasına ve duvar jet bölgesi boyunca akmasına neden olmuştur. Jetin hedef yüzeye olan mesafesinin artması ($H/D=4$) ise jetten çıkan akışkanın durma noktası etrafında yoğunlaşmasını ve akışın dağılmasını sağlamıştır. Bu nedenle $H/D=4$ durumunda durma noktası etrafındaki sıcaklık gradyanı, $H/D=2$ durumuna göre daha düşüktür. Duvar jet bölgesinde ise $H/D=4$ durumunda levha yüzey sıcaklığının $H/D=2$ durumuna göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Jet-hedef yüzey arasındaki mesafe, akış ve sıcaklık alanlarını dolayısı ile ısı transferini etkileyen önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 6. $Re_{iç}=3000, Re_{dış}=6000$ için farklı H/D için hız ve sıcaklık alanları

Şekil 7'de ise $Re_{iç}=6000$ ve $Re_{dış}=12000$ için iki farklı H/D oranlarının levha üzerindeki hız ve sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Artan halkasal jet Reynolds sayısının akış alanlarını her iki H/D oranları için oldukça etkilediği

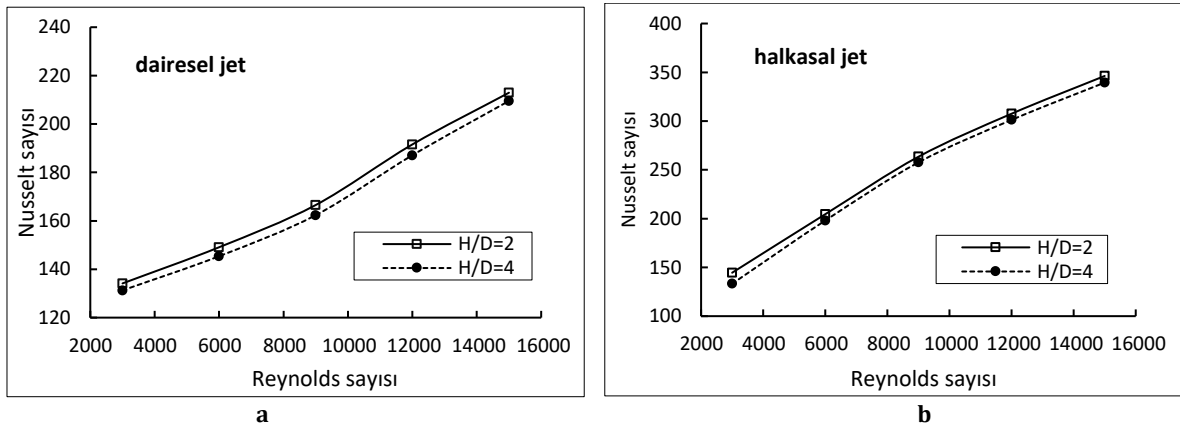
gözlenmiştir. Jet hızının artması, halkasal jetten çıkan kütleli debi miktarının artmasına neden olmaktadır. Yüksek debideki akışkan, düşük H/D mesafesinde hedef yüzeye çarptığında, akış levha boyunca etkisini göstermektedir. Yüksek jet hızlarında ve düşük jet-hedef yüzey mesafesinde ($H/D=2$) jetten çıkan yüksek debideki soğuk akışkanın sıcak hedef yüzey üzerini tamamen kapladığı görülmektedir. Bu nedenle, $H/D=2$ durumunda levha yüzey sıcaklığının daha düşük olduğu görülmektedir. Dairesel ve halkasal jet hızlarının artması, akışkanın tüm levha yüzeyi boyunca etkili olmasını sağlayamamaktadır. Çünkü $H/D=4$ durumunda jet, sadece levhanın yarısına kadar etkisini gösterirken levhanın uç kısımlarında etkisi azalmaktadır. Dolayısı ile hedef yüzeyin soğumasında dairesel ve halkasal jet hızlarının yanında jet-hedef yüzey arasındaki mesafenin de oldukça önemli olduğu görülmektedir.



Şekil 7. $Re_{iç}=6000$, $Re_{dış}=12000$ için farklı H/D oranlarına göre hız ve sıcaklık alanları.

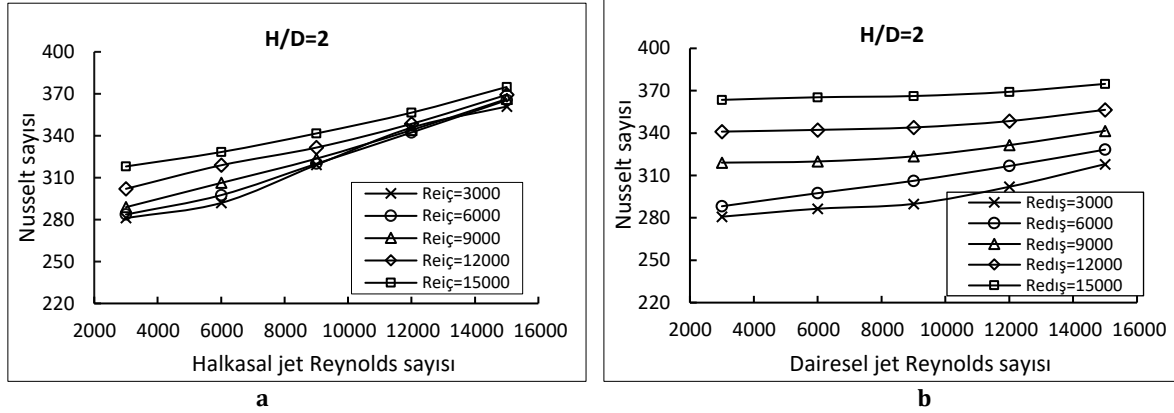
3.3. Hedef yüzeyden ısı transferi

Şekil 8'de, dairesel jetin (a) ve halkasal jetin (b) münferit olarak farklı jet-hedef yüzey arasındaki mesafeler (H/D) ve farklı jet hızları için plaka üzerine çarpması sonucunda elde edilen Nusselt sayıları verilmiştir. Her iki jet çarpması durumunda ve her iki H/D oranları için Reynolds sayısının artması ile Nusselt sayısının arttığı gözlenmiştir. Ancak her iki jet çarpmasında, $H/D=2$ durumunda elde edilen Nusselt sayısı $H/D=4$ 'ten daha yüksektir. Jet-levha arası mesafenin azalması ısı transferini artırmaktadır. Halkasal jet akışında dairesel jete göre daha yüksek Nu değerleri elde edilmiştir. Dolayısıyla ısı transferi açısından halkasal jetin dairesel jetten daha etkili olduğu söylenebilir. Dairesel jet ve halkasal jet için en yüksek ısı transferi $Re=15000$ ve $H/D=2$ durumunda sırasıyla $Nu=212,93$ ve $Nu=346,25$ olarak elde edilmiştir.



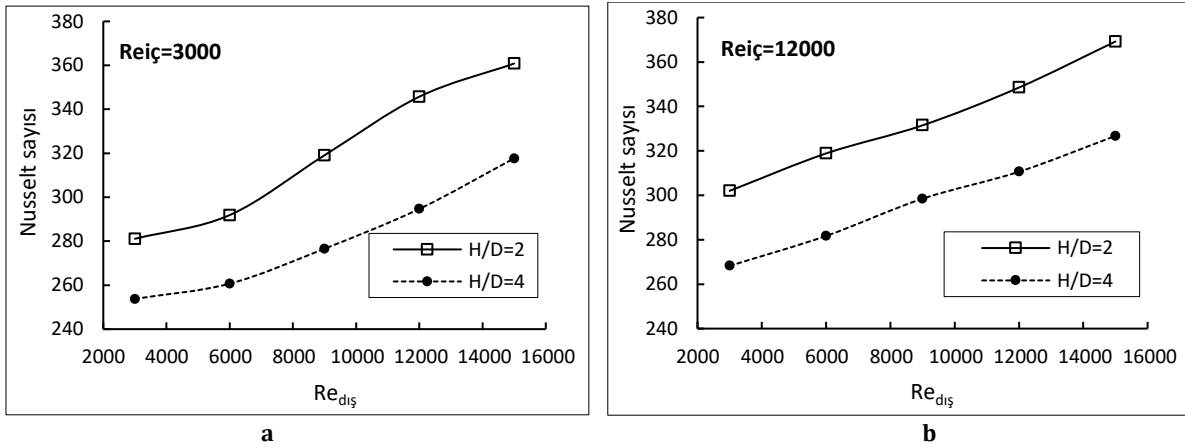
Şekil 8. Farklı H/D için Re ile Nu değişimi, (a) Dairesel jet (b) Halkasal jet

Şekil 9'da, dairesel ve halkasal jetin farklı $Re_{iç}$ (a) ve $Re_{dış}$ (b) kombinasyonları için sürekli ve eş zamanlı olarak sabit bir jet-hedef yüzey arasındaki mesafede ($H/D=2$) levhaya çarpması durumunda elde edilen Nusselt sayıları gösterilmektedir. Şekil 9a ve b'den artan $Re_{iç}$ ve $Re_{dış}$ değerleri ile Nusselt sayısının arttığı görülmektedir. Dairesel ve halkasal jetin yüksek hızlarda eş zamanlı olarak hedef yüzeye çarpması ısı transferini önemli derecede artırdığı görülmüştür. $H/D=2$ 'de en yüksek ısı transferi $Re_{iç}=15000$ ve $Re_{dış}=15000$ kombinasyonunda $Nu=374,85$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 9. $H/D=2$ 'de farklı $Re_{iç}$ (a) ve $Re_{dış}$ (b) değerlerinde Nusselt sayısının değişimi

Şekil 10'da $Re_{iç}=3000$ (a) ve $Re_{iç}=12000$ (b) olmak üzere sabit bir dairesel jet akışında, farklı $Re_{dış}$ değerleri için sürekli eş zamanlı olarak hedef yüzeye farklı mesafelerde çarpan jetlerin Nusselt sayıları karşılaştırılmıştır. Şekil 10a ve b'den sabit bir $Re_{iç}$ değerleri ($Re_{iç}=3000$ ve $Re_{iç}=12000$) için çalışılan tüm $Re_{dış}$ değerlerinde jet-hedef yüzey arasındaki mesafe azaldıkça ısı transferinin arttığı görülmektedir. $Re_{iç}=3000$ için $H/D=2$ ve $H/D=4$ 'te en yüksek ısı transferi $Re_{dış}=15000$ değerinde sırasıyla $Nu=360,84$ ve $Nu=317,68$ olarak elde edilmiştir. $Re_{iç}=12000$ için $H/D=2$ ve $H/D=4$ 'te en yüksek ısı transferi yine $Re_{dış}=15000$ değerine sırasıyla $Nu=369,22$ ve $Nu=326,72$ olarak bulunmuştur.



Şekil 10. Farklı H/D değerlerinde, $Re_{dış}$ ile Nu değişimi (a) $Re_{iç}=3000$, (b) $Re_{iç}=12000$

4. Sonuç

Bu çalışmada, dairesel ve halkasal jetin sürekli ve eş zamanlı olarak sabit ısı akısına sahip ($q'' = 1200 \text{ W/m}^2$) düz bir yüzeye çarpmasının, hedef yüzeydeki soğutma karakteristiği sayısal olarak incelenmiştir. İncelemeler, iki farklı jet-hedef yüzey arası mesafeler ($H/D: 2$ ve 4) için gerçekleştirilmiştir. Dairesel ve halkasal jetin, farklı Reynolds sayılarının kombinasyonları ile hedef yüzeyden ısı geçişi hesaplanmıştır. Sayısal çalışmada farklı parametreler için hız ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir ve sonuçlar tartışılmıştır. Çalışmadan elde edilen önemli bulgular aşağıda listelenmiştir:

- Sürekli halkasal jet akışı, dairesel jet akışına göre daha iyi ısı transferi sağlamıştır.
- Sürekli ve eş zamanlı olarak çarpan halkasal ve dairesel jetin, hedef yüzeye olan mesafesi (H/D) azaldıkça ısı transferinin arttığı gözlenmiştir.
- Halkasal ve dairesel jetlerin eş zamanlı uygulanması yüksek $Re_{dış}$ değerlerinde levha boyunca etkili olduğu, fakat düşük jet hızlarında durma noktası bölgesinde daha belirgin bir etki gösterdiği tespit edilmiştir.

- En yüksek ısı transferi, $H/D=2$ konumunda, $Re_{iç}=15000$ ve $Re_{dış}=15000$ jet hızlarında $Nu=374,85$ olarak elde edilmiştir.
- Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, eş eksenli halkasal ve dairesel jetin, farklı Reynolds sayılarının kombinasyonlarında, eş zamanlı olarak düz bir yüzeyle çarpması sonucu yüzey soğutmada önemli bir iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir.
- İleriki çalışmalarda, hedef yüzeyin etkili soğutulması amacıyla sürekli ve eşzamanlı çarpan jet akışlarında, jet sayısı, akışkan tipi, akış rejimi, hedef yüzey geometrisi, jet geometrik parametreleri değiştirilerek akış ve ısı transferi incelenebilir. Elde edilecek çalışma sonuçları, ısıtma, soğutma ve kurutma gibi ısı transfer uygulamalarıyla ilgilenen araştırmacılar ve farklı sektörler için önemli bir rol gösterici olacaktır. Elde edilecek daha yüksek ısı transfer hızı nedeniyle enerjinin etkin kullanımı dolayısıyla enerji tasarrufu sağlanacaktır.

Semboller dizini

B	Boyutsuz jet-hedef yüzey arası mesafe	Pr	Prandtl sayısı
C_p	Özgül ısı (kJ/kgK)	$Re_{dış}$	Halkasal jet Reynolds sayısı
D_h	Hidrolik çap (m)	$Re_{iç}$	Dairesel jet Reynolds sayısı
H	Jet-hedef yüzey arası mesafe (m)	T_s	Yüzey sıcaklığı (K)
h	Isı transfer katsayısı (W/m ² K)	T_{∞}	Ortam sıcaklığı (K)
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)	u	Ortalama hız (m/s)
L	Levha yarıçapı (m)	P	Dinamik basınç (Pa)
Nu	Nusselt sayısı	μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
q"	Isı akısı (W/m ²)	ρ	Akışkan yoğunluğu (kg/m ³)

Teşekkür

Bu çalışma, Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (ASÜ-BAP 2023-05 nolu proje) kapsamında desteklenmiştir. Sağlanan desteğe teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Celik, N. ve Turgut, E. 2012. Design Analysis of an Experimental Jet Impingement Study by Using Taguchi Method. *Heat Mass Transfer*, 48, 1407-1413.
- [2] Kalifa, R.B., Habli, S., Said, N.M., Bournot, H. Palec, G.L. 2016. Parametric Analysis of a Round Jet Impingement on a Heated Plate. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 57, 11-23.
- [3] Nuntadusit, C., Wae-Hayee, M., Bunyajitradulya, A., Eiamsa-ard, S. 2012. Visualization of Flow and Heat Transfer Characteristics for Swirling Impinging Jet. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 640-648.
- [4] Friedrich, B.K., Ford, T.D., Glaspell, A.W., Choo, K. 2017. Experimental Study of the Hydrodynamic and Heat Transfer of Air-Assisted Circular Water Jet Impinging a Flat Circular Disk. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 804-809.
- [5] Akdağ, Ü., Akçay, S., Karabayır, M.L. 2023. Experimental Investigation of the Heat Transfer Characteristics of a Pulsating Impinging Jet on a Flat Surface. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(2), 889-899.
- [6] Hosain, M.L., Fdhila, R.B. Daneryd, A. 2016. Heat Transfer By Liquid Jets Impinging on Hot Flat Surface. *Applied Energy*, 95(164), 934-943.
- [7] Frosella, T., Frippa, M., Gutmarkb, E. 2018. Dynamics of the Impingement Region of a Circular Turbulent Jet. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 91, 399-409.
- [8] Lee, J., Lee, S.J. 2000. The Effect of Nozzle Aspect Ratio on Stagnation Region Heattransfer Characteristics of Elliptic Impinging Jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 555-575.
- [9] Yasaswy, N.S, Saroj, S., Hindasageri, V., Prabhu, S.V. 2014. Local Heat Transfer Distribution of an Impinging Air Jet Through a Crossflow. *International Journal of Thermal Sciences*, 79, 250-259.
- [10] Kılıç, M., Başkaya, Ş. 2017. Farklı Geometride Akış Yönlendiriciler ve Çarpan Jet Kullanarak Yüksek Isı Akılı Bir Yüzeyden Olan Isı Transferinin İyileştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 693-707.
- [11] Alnak, D.E Karabulut, K. 2019. Hava Jeti Çarpmalı Kurutma için Farklı Dairesel Nemli Nesne Geometrilerinin Isı ve Kütle Transferi Üzerindeki Etkisinin Araştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24 (1), 51-62.
- [12] Golda, P., Lettner, N., Schießl, R. Maas, U. 2021. Experimental Investigation of The Cryogenic Ln₂-Cooling Performance for an Impinging Jet Configuration for Different Inflow Conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 180, 121776.

- [13] Zhong, Y., Zhou, C. ve Shi, Y. 2022. Effect of the Nozzle Geometry on Flow Field and Heat Transfer in Annular Jet Impingement. *Energies*, 15, 4271.
- [14] Ryzhenkov, V. Mullyadzhanov, R. 2017. Large-eddy Simulations of the Near Field of a Turbulent Annular Jet, *Journal of Physics, Conf. Series*, 899, 022014.
- [15] Philippov, M.V., Chokhar, I.A., Terekhov, V.V., Terekhov, V.I., Baranov, I.N. 2021. Experimental Investigation of Heat and Mass Transfer of an Annular Impinging Jet. *Journal of Physics*, 2039, 012028.
- [16] Celik, N., 2006. Optimum Lüle Şeklinin Çarpan Jet Üzerinde Etkilerinin İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 267s, Elâzığ.
- [17] Kalinina, S.V., Terekhov, V.I. Sharov, K.A. 2015. Special Features of Flow in an Annular Jet Impinging on a Barrier. *Fluid Dynamics*, 50(5), 665–671.
- [18] Markal, B. 2018. Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics and Wall Pressure Distribution of Swirling Coaxial Confined Impinging Air Jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 517-532.
- [19] Aydin, O., Markal, B. 2018. Experimental Investigation of Coaxial Impinging Air Jets. *Applied Thermal Engineering*, 141, 1120-1130.
- [20] Terekhov, V.I., Kalinina, S.V., Sharov, K.A. 2018. Convective Heat Transfer at Annular Jet Impingement on a Flat Blockage. *High Temperature*, 56, 217-222.
- [21] Afroz, F., Sharif, M.A.R. 2018. Numerical Study of Turbulent Annular Impinging Jet Flow and Heat Transfer from a Flat Surface. *Applied Thermal Engineering*, 138, 154-172.
- [22] Ibramiov, U. 2019. İkili Çarpan Jet Akışında Akış ve Isı Transferi Parametrelerinin İncelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Niğde.
- [23] Dutta, P., Chattopadhyay, H. 2021. Numerical Analysis of Transport Phenomena under Turbulent Annular Impinging Jet. *Computational Thermal Sciences*, 13(2), 1–19.
- [24] Fenot, M., Dorignac, E., Lantier, R. 2021. Heat Transfer and Flow Structure of a Hot Annular Impinging Jet. *International Journal of Thermal Sciences*, 170, 107091.
- [25] Kılıç, M., Şahin, M., Iqbal, M., Demircan, T., Kılınc, Z., Ullah, A. 2023. Numerical Investigation of Cooling an Industrial Roller by Using Swirling Jets. *ECJSE*, 10 (1), 147–159.
- [26] Ahmed, Z.U., 2016. An Experimental and Numerical Study of Surface Interactions in Turbulent Swirling Jets, Edith Cowan University, School of Engineering, Doctoral Thesis, 234 pp, Australia.
- [27] Rakhsha, S., Zargarabadi, M.R., Saedodin, S. 2021. Experimental and Numerical Study of Flow and Heat Transfer from a Pulsed Jet Impinging on a Pinned Surface. *Experimental Heat Transfer*, 34(4), 376-391.

Efficiency Improvement of Organic Photovoltaic Solar Cells via Spin Radical Doping

Kevser Şahin Tıraş 

*₁ Erciyes University, Faculty of Sciences, Department of Physics, KAYSERİ

(Alınış / Received: 05.03.2024, Kabul / Accepted: 19.03.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

Keywords

Organic photovoltaics,
Magnetic field effects,
Polymers

Abstract: Upon absorption of the sunlight, an excited energy state called exciton is generated in organic photovoltaics (OPV). There exist two kinds of excitons, singlet and triplet excitons. In OPV, the power conversion efficiency (PCE) is limited by the short lifetime of singlet excitons since they recombine quickly. To overcome this problem, we have introduced the spin $\frac{1}{2}$ radical galvinoxyl into the MEH-PPV: PCBM bulk heterojunction to harvest triplets efficiently. The photovoltaic device shows an enhancement in PCE compared to the device without galvinoxyl. To reveal the underlying mechanism for the increase in PCE, magneto-photoconductance (MPC) of the OPVs was measured for the films, doped with various galvinoxyl concentration rates.

Spin Radikal Katkılama Yoluyla Organik Fotovoltaik Güneş Pillerinin Verimliliğinin Artırılması

Anahtar Kelimeler

Organik fotovoltaik,
Manyetik alan etkisi,
Polimerler

Öz: Güneş ışığının absorbesi üzerine, organik fotovoltaiklerde (OPV) eksiton adı verilen uyarılmış bir enerji durumu oluşur. Singlet ve triplet eksitonlar olmak üzere iki tür eksiton vardır. OPV'de güç dönüşüm verimliliği (PCE), singlet eksitonların kısa ömürleri nedeniyle sınırlıdır, çünkü bunlar hızla rekombine olurlar. Bu sorunun üstesinden gelmek için, spin $\frac{1}{2}$ radikali galvinoxili MEH-PPV: PCBM bulk heterojonksiyonuna dahil ederek tripletleri verimli bir şekilde elde ettik. Fotovoltaikler, galvinoxyl içermeyen cihaza kıyasla PCE'de artış göstermektedir. PCE'deki artışın altında yatan mekanizmayı ortaya çıkarmak için, OPV'lerin manyeto-fotokondüktansı (MPC), çeşitli galvinoxil konsantrasyon oranları ile katkılanmış filmler için ölçülmüştür.

*İlgili Yazar, email: kevsersahintiras@erciyes.edu.tr

1. Introduction

In order to meet the challenges of increasing energy demand, solar energy has been identified as the most important source of renewable energy. There have been many studies to improve the device efficiencies of organic photovoltaics (OPV) [1-12]. Typical bulk heterojunction structure for OPV devices consists of an active layer sandwiched between the anode and cathode. The blend of π -conjugated polymer and fullerene is simply spin-coated to create the active layer. It is well-known that the materials with delocalized π -electron systems absorb sunlight, create photogenerated charge carriers and transport these charge carriers [13,14]. The blend of poly[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] (MEH-PPV) (donor-D) and 1-(3-(methoxycarbonyl)propyl)-1-phenyl(6,6)C61 (PCBM) (acceptor-A) is commonly used polymer:fullerene mixture for the active layer of OPV. MEH-PPV polymer chains absorb light, and excitons are first generated in the donor nano domains; subsequent dissociation at D-A interfaces occurs due to the difference in energy levels between the donor's LUMO and the acceptor's HOMO (lowest to highest occupied molecular orbital) [15]. For the

excitons to transfer to the D–A interface, they first move to the polymer domain boundary (~ 10 ps) where upon arrival they generate charge transfer excitons [15,16]. These excitons dissociate to create Coulombically bounded polaron pairs (PP) which have longer lifetime (a few microseconds) and are intermediate species at D-A interface [17-19]. The PP species may eventually split into "free" electron and hole polarons that can easily be gathered at the anode and cathode, respectively, and are accessible for charge transport via the A and D domains. Device efficiency (η) is low due to recombination of PP at D-A interfaces [16,20-22]. Numerous attempts related to active layer have been studied such as concentration, thickness, dopant addition etc. to optimize low η [6-12]. In the current work, we present a novel approach to decrease PP recombination at the polymer/fullerene interfaces by doping the device active layer with spin 1/2 radicals. In the context of organic solar cells and organic light-emitting diodes, the effects of additional radical dopant spins were initially investigated. It was found that for a certain doping rate both the efficiency and short circuit current of the doped devices were improved. In the present study, galvinoxyl (commercially available spin radical) (2,6-di-*t*-butyl-(3,5-di-*t*-butyl-4-oxo-2,5-cyclohexadien-1-ylidene)-*p*-tolylxy) at different concentrations was doped into the blend of MEH-PPV: PCBM to observe the enhancement in device power conversion efficiency, PCE (η). We additionally measure the magneto-photocurrent (MPC) response, which is sensitive to spin-flip between singlet and triplet PP. Spin-flip mechanism enables PP separation at D-A interfaces by converting photogenerated PP from spin singlet to spin triplet via spin exchange between PP and galvinoxyl. To better understand the origin of the improved efficiency, photoluminescence (PL) of the pristine and galvinoxyl-doped MEH-PPV films was measured.

2. Materials and Methods

2.1. OPV device fabrication and characterization

Figure 1 A and B show the device structure of OPV and the chemical structures of the active layer materials, respectively. For the anode layer, 40 nm transparent indium tin oxide (ITO) coated glass substrates (Delta Technologies) were cleaned by ultrasonic treatment (in acetone, Helmanexx, deionized water and isopropanol alcohol sequentially) and followed by oxygen plasma cleaning. The conducting polymer poly (3,4-ethylene dioxythiophene)-poly (styrene sulfonate) (PEDOT: PSS), purchased from Ossila Ltd., was spin coated at 4000 rpm for 60 s at ambient conditions onto the ITO layer with 50 nm thickness to provide sufficient hole transport to the active layer. Then, they were transferred to a nitrogen-filled glovebox ($O_2 < 1$ ppm) for annealing at 150 °C for 30 min. The organic blend was used as the active layer was spin coated from a blend of Poly[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene], MEH-PPV (Sigma Aldrich) polymer as donor, [6,6]-phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester, PCBM (Nano-C) fullerene as acceptor and galvinoxyl (Aldrich) as spin radical (only for doped devices). The blend was prepared by dissolving MEH-PPV (8 mg/ml) and PCBM at 1:4 weight ratio in chlorobenzene. The blend was doped with different concentration rates of galvinoxyl solution between 0% to 17%. The active layer was spin-coated from the blend at 2000 rpm for 60 s and annealed at 120 °C for 1 hour. As the cathode layer, 30 nm thick Ca followed by 100 nm thick Al was thermally evaporated to provide effective electron injection to the active layer at a base pressure of 10^{-7} mbar. The device area was 1×1 mm². The samples were placed inside the dynamic vacuum of a cryostat located between the poles of an electromagnet to measure *I-V* characteristics, MPC and PL. The solar cells were tested by the solar simulator with AM1.5G filter and a xenon lamp. Keithley 2400 sourcemeter unit was used to measure *I-V* characteristics of the device. PL emission of the doped and undoped blend was excited by 100 mW continuous wave laser at 488 nm.

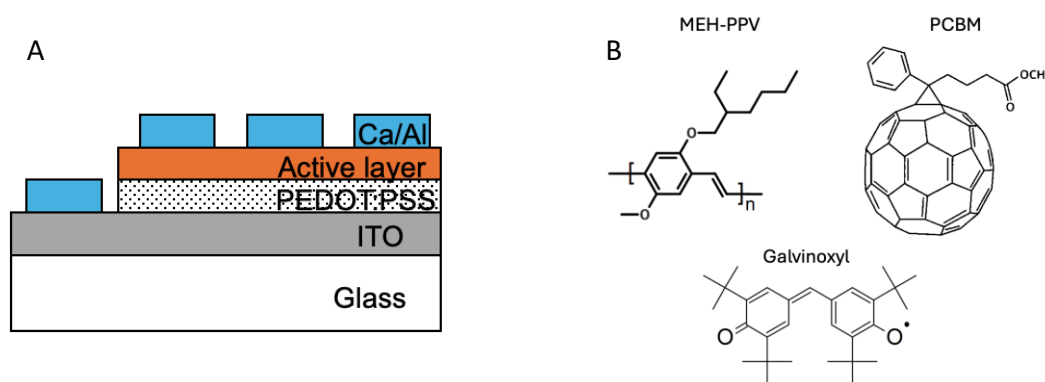


Figure 1. A) Device structure of OPV, B) Chemical structures of MEH-PPV, PCBM and galvinoxyl.

2.2. Magneto-photocurrent measurements

MPC measurements were performed in a closed cycle He cryostat positioned between the poles of an electromagnet at room temperature. The magnetic field, B which the electromagnet produced was up to 300 mT. While the solar cells were illuminated with 80 mW cm⁻² Xenon lamp, Keitley 2400 sourcemeter unit was used to measure at zero bias as the B field sweeps. The value MPC was calculated by using Equation 1,

$$MPC(B) = \left[\frac{PC(B)}{PC(0)} - 1 \right] \quad (1)$$

PC(B) is photocurrent when the magnetic field is on, and PC (0) is when it is off.

3. Results

The spin 1/2 radical we chose for our experiments has a conjugated molecule with C₂ symmetry. By keeping other molecules apart, the large t-butyl groups on the molecule stabilize the radical and prevent further radical-radical contact in the solid state. Even when there is oxygen present, this molecule remains stable [23, 24]. Its chemical structure can be thought of as a resonance hybrid of two configurations with a localized unpaired spin-polarized electron on different oxygen since the unpaired electron is delocalized throughout the entire molecule.

We note that the weight ratio for the blend of MEH-PPV: PCBM was optimized at 1:4. The effect of spin 1/2 radical galvinoxyl doping in the active layer of MEH-PPV: PCBM on solar cell characteristics was observed. The power conversion efficiency of a solar cell is calculated by using general parameters; V_{MPP}, J_{MPP} and P_{in} as shown in Equation 2,

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{MPP}J_{MPP}}{P_{in}} \quad (2)$$

V_{MPP} is the voltage at the maximum power point, and J_{MPP} is the point current at the maximum power (P_{max}) that can be obtained by the device. P_{in} is the incident power that is provided by the solar simulator. The plot of η and J_{sc} for the solar cells depending on the doping level of the galvinoxyl spin radical is given in Figure 2 A and B, respectively. The galvinoxyl radical-induced boost in J_{sc} and η peaks at around 3% and subsequently disappears with additional increasing doping. As the doping concentration rate changed from 0% to 17%, the obtained value for η varies from ~0.7% to 0.5%. At 3% doping level η reaches the maximum value of ~0.85%. Similar change was observed for the J_{sc} which varies from ~1.8 mAcm⁻² to ~1.6 mAcm⁻² as the doping level changes between 0% to 17%. At 3% doping level, J_{sc} increases to 2.4 mAcm⁻². About half of the improvement in the device η can be attributed to a 33% rise in J_{sc}, which suggests that carrier photogeneration is either increased or carrier recombination is decreased, or both. The device performance started to suppress at higher galvinoxyl doping levels (>10%). Similar results about the enhancement of OPV and OLED devices were obtained by other groups [25-27]. The action of galvinoxyl additions is divided into two regimes by the ideal doping concentration (3%) at which η maximizes: an "enhancement" regime where η grows with doping and a "suppression" regime where η declines with doping [26].

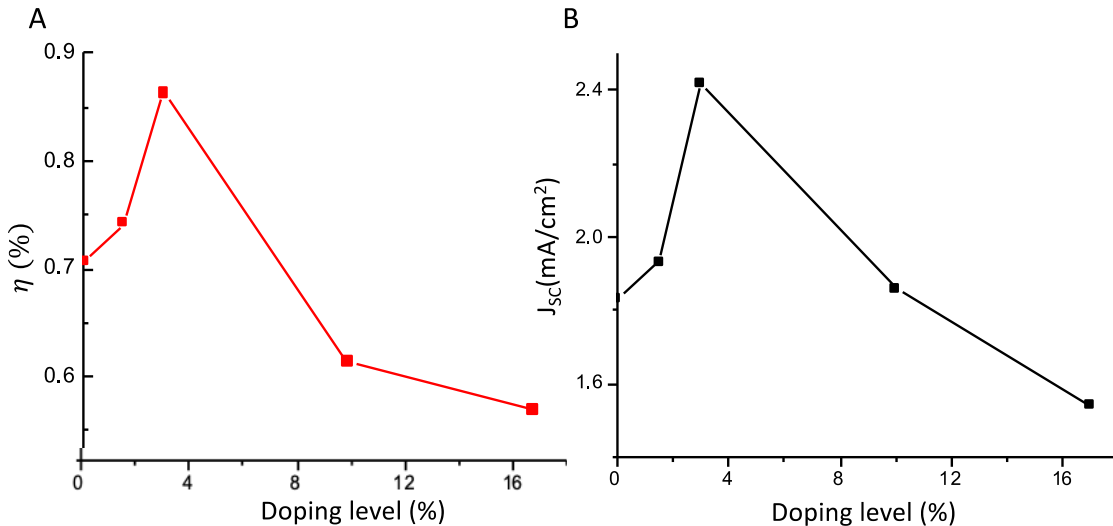


Figure2. A) η and B) J_{sc} versus galvinoxyl doping level plots.

The I - V properties of MEH-PPV:PCBM devices doped with different weight percentages of galvinoxyl radicals are displayed in Figure 3B. To see if the improvement in J_{sc} with the addition of galvinoxyl is also due to an improvement in device active layer optics, we compared PL spectra for the pure MEH-PPV:PCBM films and those that have been doped with galvinoxyl. Figure 3A shows the PL spectrum of pristine and galvinoxyl doped blend films. PL is due to the radiative emission of photon excited states generated by photon absorption. There are two PL emission peaks at 1.9 eV and 2.05 eV appearing in both films. As the π -electrons relax to the inter-chain states, PL emission peak at 1.9 eV appears. The other peak at 2.05 eV is the result of the relaxation of the π -electrons to the ground state [28, 29]. The quenching of the PL spectrum as the blend doped with galvinoxyl confirms that the population of the triplet excitons (longer lived excitons) increased.

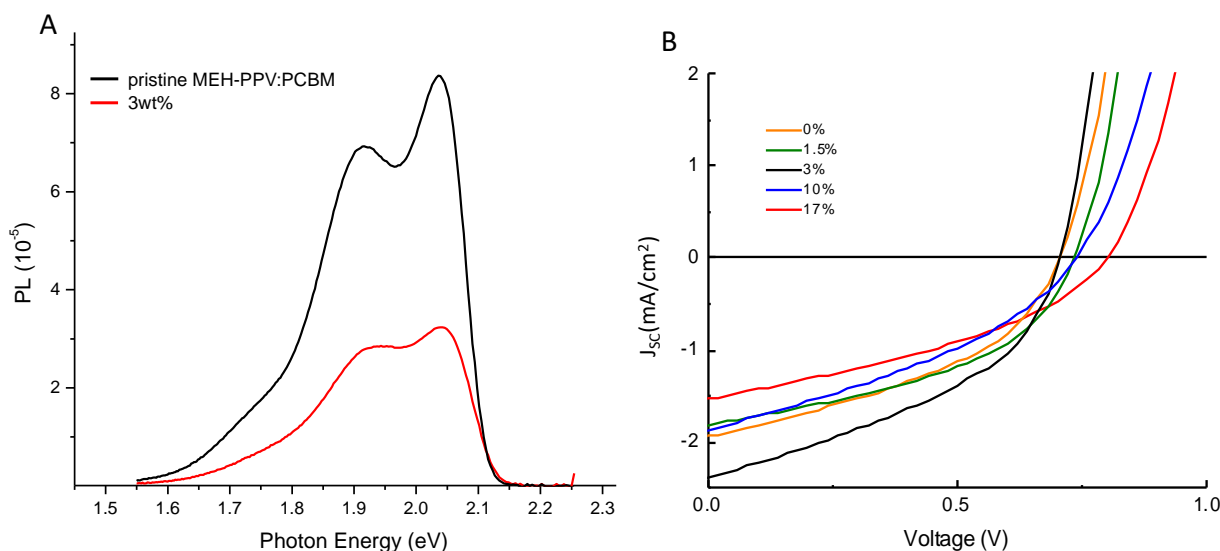


Figure3. A) PL spectrum of pristine and galvinoxyl doped (3 wt.%) MEH-PPV:PCBM blend film and OPV device and B) I - V characteristics of the OPV solar cells doped with various wt.% of galvinoxyl radical.

The ratios of singlet and triplets can be altered by an external B-field through formation and intersystem conversion, leading to MFES in PL based on intra- and intermolecular excitation states. To understand underlying mechanism of the improved characteristics of solar cell in galvinoxyl doped devices, MPC measurements were performed. Figure 4 shows MPC response of OPV devices with various galvinoxyl doping. It is clearly seen when the galvinoxyl doping level is 3%, MPC reaches the maximum response. MPC in OPV blends is due to magnetic field manipulation of spin triplet and singlet states within the PP spin manifold [30-32]. MPC value was increased from 3% to 6% when galvinoxyl doping rate was changed from 0 wt.% to 3 wt.%. However, as the doping level increased MPC value becomes 2% which is less than the value at 0 wt.%. Consequently, the lowering of MPC with galvinoxyl weight percentage demonstrates that the spin 1/2 radicals disrupt the intersystem crossing rates between the different spin states of the PP species, emphasizing the significance of the galvinoxyl spin instead of its donor/acceptor properties. The improved carrier photogeneration following galvinoxyl doping is caused by reduced PP geminate recombination at the D-A interfaces.

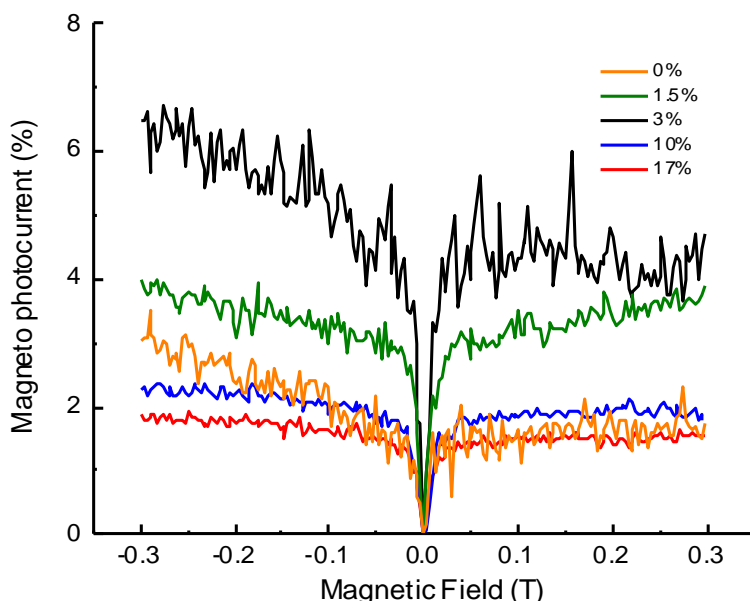


Figure 4. MPC response of OPV devices doped with various wt.% of galvinoxyl radical up to field, B of 300 mT.

We notice that the pattern of the OPV enhancement with weight percentage and the MPC value with galvinoxyl weight percentage are similar. At 3 wt.%, the maximum increase in MPC is observed; at 10 wt.%, its value returns to that of undoped device. This demonstrates that there is a strong relation between the spin $\frac{1}{2}$ properties of galvinoxyl additives and the enhancement of the characteristics of OPV.

4. Discussion and Conclusion

Our most recent research on spin-enhanced bulk heterojunction organic solar cells is presented in this study. We were able to improve the performance of the solar cell device by doping MEH-PPV: PCBM OPV with spin $\frac{1}{2}$ radical galvinoxyl. We observed that this boost is directly connected to the radical's spin degree of freedom, which through spin-spin interaction lowers the rate of PP recombination at the MEH-PPV: PCBM interfaces. For the enhancement to take place, the donor/acceptor interface must exist in the active layer. Experiments show that galvinoxyl-doped OPV devices have a higher PCE value due to reduced PP recombination at the MEH-PPV: PCBM domain interfaces from spin $\frac{1}{2}$ radical additions. Galvinoxyl, a spin $\frac{1}{2}$ radical, is thought to improve PP separation at MEH-PPV: PCBM interfaces by changing photogenerated PP from spin singlet to spin triplet by spin exchange interaction with galvinoxyl. Since triplet PP has a longer lifetime than singlet PP, the improved intersystem crossing yields a long-lived PP species with a higher probability of dissociating into free polarons. Density functional theory (DFT) calculations related to the physical results of this model were investigated by Zhang et al. [25] At high concentrations of galvinoxyl doping, triplet-triplet annihilation of triplet PP accumulated at the D-A interface may eventually occur, resulting in radiation loss rather than dissociation into free electrons and holes.

Acknowledgment

This work was supported by Erciyes University Research Fund Grant No. FBA-2022-11983.

References

- [1] Peet, J., Senatore, M.L., Heeger, A.J. and Bazan, G.C., 2009. The role of processing in the fabrication and optimization of plastic solar cells. *Advanced Materials*, 21(14-15), pp.1521-1527.
- [2] Chen, L.M., Hong, Z., Li, G. and Yang, Y., 2009. Recent progress in polymer solar cells: manipulation of polymer: fullerene morphology and the formation of efficient inverted polymer solar cells. *Advanced materials*, 21(14-15), pp.1434-1449.

- [3] Yang, K., Arif, M., Förster, M., Scherf, U. and Guha, S., 2009. Triplet excitons in a ladder-type conjugated polymer: Application in solar cells. *Synthetic metals*, 159(21-22), pp.2338-2341.
- [4] Chang, M.Y., Chen, Y.F., Tsai, Y.S. and Chi, K.M., 2008. Blending platinum nanoparticles into poly (3-hexylthiophene)-[6, 6]-phenyl-C61-butyric acid methyl ester enhances the efficiency of polymer solar cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 156(2), p.B234.
- [5] Tung, V.C., Chen, L.M., Allen, M.J., Wassei, J.K., Nelson, K., Kaner, R.B. and Yang, Y., 2009. Low-temperature solution processing of graphene– carbon nanotube hybrid materials for high-performance transparent conductors. *Nano letters*, 9(5), pp.1949-1955.
- [6] Eakins, G.L., Alford, J.S., Tiegs, B.J., Breyfogle, B.E. and Stearman, C.J., 2011. Tuning HOMO–LUMO levels: trends leading to the design of 9-fluorenone scaffolds with predictable electronic and optoelectronic properties. *Journal of Physical Organic Chemistry*, 24(11), pp.1119-1128.
- [7] Du, H., Deng, Z., Lü, Z., Yin, Y., Yu, L., Wu, H., Chen, Z., Zou, Y., Wang, Y., Liu, H. and Li, Y., 2011. The effect of graphdiyne doping on the performance of polymer solar cells. *Synthetic metals*, 161(19-20), pp.2055-2057.
- [8] Zhou, M., Wang, B., Jiang, X., Zakhidov, A.A., Ferraris, J.P., Azunskis, D. and Hanley, L., 2011. Synthesis of PbS Nanocrystal/Functionalized Conducting Polymers for Plastic Solar Cells. *International Journal of Nanoscience*, 10(03), pp.521-532.
- [9] Zhang, C., Sun, J., Li, R., Sun, S.S., Lafalce, E. and Jiang, X., 2011. Poly (3-dodecylthiophenevinylene) s: Regioregularity and Crystallinity. *Macromolecules*, 44(16), pp.6389-6396.
- [10] Gorenflot, J., Sperlich, A., Baumann, A., Rauh, D., Vasilev, A., Li, C., Baumgarten, M., Deibel, C. and Dyakonov, V., 2012. Detailed study of N, N'-(diisopropylphenyl)-terrylene-3, 4: 11, 12-bis (dicarboximide) as electron acceptor for solar cells application. *Synthetic metals*, 161(23-24), pp.2669-2676.
- [11] Zeng, W., Yong, K.S., Kam, Z.M., Chen, Z.K. and Li, Y., 2012. Effect of MoO₃ as an interlayer on the performance of organic solar cells based on ZnPc and C60. *Synthetic metals*, 161(23-24), pp.2748-2752.
- [12] Zhao, Y., Guo, X., Xie, Z., Qu, Y., Geng, Y. and Wang, L., 2009. Solvent vapor-induced self assembly and its influence on optoelectronic conversion of poly (3-hexylthiophene): Methanofullerene bulk heterojunction photovoltaic cells. *Journal of applied polymer science*, 111(4), pp.1799-1804.
- [13] Yao, Y., Hou, J., Xu, Z., Li, G. and Yang, Y., 2008. Effects of solvent mixtures on the nanoscale phase separation in polymer solar cells. *Advanced Functional Materials*, 18(12), pp.1783-1789.
- [14] Perez, M.D., Borek, C., Forrest, S.R. and Thompson, M.E., 2009. Molecular and morphological influences on the open circuit voltages of organic photovoltaic devices. *Journal of the American Chemical Society*, 131(26), pp.9281-9286.
- [15] Singh, S., Pandit, B., Basel, T.P., Li, S., Laird, D. and Vardeny, Z.V., 2012. Two-step charge photogeneration dynamics in polymer/fullerene blends for photovoltaic applications. *Physical Review B*, 85(20), p.205206.
- [16] Bakulin, A.A., Rao, A., Pavelyev, V.G., van Loosdrecht, P.H., Pshenichnikov, M.S., Niedzialek, D., Cornil, J., Beljonne, D. and Friend, R.H., 2012. The role of driving energy and delocalized states for charge separation in organic semiconductors. *Science*, 335(6074), pp.1340-1344.
- [17] Benson-Smith, J.J., Goris, L., Vandewal, K., Haenen, K., Manca, J.V., Vanderzande, D., Bradley, D.D. and Nelson, J., 2007. Formation of a Ground-State Charge-Transfer Complex in Polyfluorene//[6, 6]-Phenyl-C61 Butyric Acid Methyl Ester (PCBM) Blend Films and Its Role in the Function of Polymer/PCBM Solar Cells. *Advanced Functional Materials*, 17(3), pp.451-457.
- [18] Drori, T., Holt, J. and Vardeny, Z.V., 2010. Optical studies of the charge transfer complex in polythiophene/fullerene blends for organic photovoltaic applications. *Physical Review B*, 82(7), p.075207.
- [19] Behrends, J., Sperlich, A., Schnegg, A., Biskup, T., Teutloff, C., Lips, K., Dyakonov, V. and Bittl, R., 2012. Direct detection of photoinduced charge transfer complexes in polymer fullerene blends. *Physical Review B*, 85(12), p.125206.
- [20] Ohkita, H., Cook, S., Astuti, Y., Duffy, W., Tierney, S., Zhang, W., Heeney, M., McCulloch, I., Nelson, J., Bradley, D.D. and Durrant, J.R., 2008. Charge carrier formation in polythiophene/fullerene blend films studied by transient absorption spectroscopy. *Journal of the American Chemical Society*, 130(10), pp.3030-3042.
- [21] Holt, J., Singh, S., Drori, T., Zhang, Y. and Vardeny, Z.V., 2009. Optical probes of π -conjugated polymer blends with strong acceptor molecules. *Physical Review B*, 79(19), p.195210.
- [22] Howard, I.A., Mauer, R., Meister, M. and Laquai, F., 2010. Effect of morphology on ultrafast free carrier generation in polythiophene: fullerene organic solar cells. *Journal of the American Chemical Society*, 132(42), pp.14866-14876.
- [23] Coppinger, G.M., 1957. A stable phenoxy radical inert to oxygen. *Journal of the American Chemical Society*, 79(2), pp.501-502.
- [24] Kharasch, M.S. and Joshi, B.S., 1957. Reactions of hindered phenols. I. Reactions of 4, 4'-dihydroxy-3, 5, 3', 5'-tetra-tert-butyl diphenylmethane. *The Journal of Organic Chemistry*, 22(11), pp.1435-1438.
- [25] Zhang, Y., Basel, T.P., Gautam, B.R., Yang, X., Mascaro, D.J., Liu, F. and Vardeny, Z.V., 2012. Spin-enhanced organic bulk heterojunction photovoltaic solar cells. *Nature communications*, 3(1), p.1043.
- [26] Zhang, Y., Gautam, B.R., Basel, T.P., Mascaro, D.J. and Vardeny, Z.V., 2013. Organic bulk heterojunction solar cells enhanced by spin interaction. *Synthetic metals*, 173, pp.2-9.

- [27] Wang, Y., Harmon, N.J., Sahin-Tiras, K., Wohlgenannt, M. and Flatté, M.E., 2014. Anomalous organic magnetoresistance from competing carrier-spin-dependent interactions with localized electronic and nuclear spins. *Physical Review B*, 90(6), p.060204.
- [28] Yang, S.H., Le Rendu, P., Nguyen, T.P. and Hsu, C.S., 2007. Fabrication of MEH-PPV/SiO₂ and MEH-PPV/SiO₂ nanocomposites with enhanced luminescent stabilities. *Reviews on Advanced Materials Science*, 15(2), pp.144-149.
- [29] Mahmoud, F.A., Elazab, I., Abo-Elenien, O.M., Abdel Fatah, A. and Ahmed, A.A., 2019. Optical characterization of Poly [2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy-p-phenylene vinylene)](MEH-PPV): C60, MEH-PPV: C60: TiO₂ and MEHPPV: C60: ZnO Thin Films. *Egyptian Journal of Chemistry*, 62(2), pp.311-323.
- [30] Zang, H., Xu, Z. and Hu, B., 2010. Magneto-optical investigations on the formation and dissociation of intermolecular charge-transfer complexes at donor- acceptor interfaces in bulk-heterojunction organic solar cells. *The Journal of Physical Chemistry B*, 114(17), pp.5704-5709.
- [31] Shakya, P., Desai, P., Kreouzis, T., Gillin, W.P., Tuladhar, S.M., Ballantyne, A.M. and Nelson, J., 2008. The effect of applied magnetic field on photocurrent generation in poly-3-hexylthiophene:[6, 6]-phenyl C61-butyric acid methyl ester photovoltaic devices. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20(45), p.452203.
- [32] Lei, Y., Song, Q., Zhang, Y., Chen, P., Liu, R., Zhang, Q. and Xiong, Z., 2009. Magnetoconductance of polymer-fullerene bulk heterojunction solar cells. *Organic electronics*, 10(7), pp.1288-1292.

Dizel Motorda Yakıt Katkı Maddesi Olarak Nanopartiküllerin Kullanımının Araştırılması

Erdal Çilgin^{*1}, Halis Deviren²

*^{1,2} Dicle Üniversitesi Diyarbakır Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, DİYARBAKIR

(Alınış / Received: 27.02.2024, Kabul / Accepted: 30.03.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

Anahtar Kelimeler

Dizel Motor,
Katkı Madde,
Nano Partikül
Yanma,
Emisyon

Öz: Bu çalışma, %80 dizel yakıtı (DY) ve %20 terebentin yağından elde edilen biyodizelin karışımı olan B20 yakıtına magnezyum oksit (MgO) nanopartikülleri (NP) eklenerek oluşturulan B20-NP yakıtının yanma ve emisyon performansının, standart B20 ve DY'ye kıyasla detaylı analizini sunmaktadır. Araştırma, öncelikle terebentin yağından (TY) esterifikasyon ve transesterifikasyon yöntemleri ile biyodizel üretimini içermekte, ardından bu biyodizel ile DY karışımından test yakıtlarının hazırlanmasını takip etmektedir. Elde edilen yakıtlar, dizel motorunda yapılan testlerle değerlendirilmiştir. Test sonuçları, B20-NP yakıtının, standart B20'ye göre karbon monoksit (CO) emisyonlarında %1,26 azalma, hidrokarbon (HC) emisyonlarında %6,98 düşüş ve azot oksit (NO_x) emisyonlarında %4,65 artış sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, B20-NP yakıtının yanma performansının incelenmesi, silindir içi basınçta (SB) %1,85, net ısı salınım hızında (NISH) %3,03 ve ortalama gaz sıcaklıklarında (OGS) %6,62 oranında iyileşme sağladığını göstermiştir. Bu bulgular, MgO nanopartikülleri ile iyileştirilmiş biyodizel yakıt karışımlarının, dizel motorların yanma ve emisyon karakteristiklerini iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu vurgulamaktadır.

Investigating the Use of Nanoparticles as Fuel Additive in Diesel Engine

Keywords

Diesel Engine,
Additive,
Nano Particles,
Combustion,
Emission

Abstract: This study presents a detailed analysis of the combustion and emission performance of B20-NP fuel, which is created by adding magnesium oxide (MgO) nanoparticles (NPs) to B20 fuel—a mixture of 80% diesel fuel (DF) and 20% biodiesel obtained from turpentine oil (TO) —compared to standard B20 and DF. The research primarily involves the production of biodiesel from TO through esterification and transesterification methods, followed by the preparation of test fuels from a mixture of this biodiesel and DF. The obtained fuels were evaluated through tests conducted on a diesel engine. The test results revealed that the B20-NP fuel led to a 1.26% reduction in carbon monoxide (CO) emissions, a 6.98% decrease in hydrocarbon (HC) emissions, and a 4.65% increase in nitrogen oxide (NO_x) emissions compared to the standard B20. Furthermore, the examination of the combustion performance of the B20-NP fuel has demonstrated improvements of 1.85% in cylinder inside pressure (CP), 3.03% in net heat release rate (NHRR), and 6.62% in mean gas temperatures (MGT). These findings highlight the potential of biodiesel fuel mixtures enhanced with MgO NPs to improve the combustion and emission characteristics of diesel engines.

*İlgili Yazar, email: erdal.cilgin@dicle.edu.tr

1. Giriş

Küresel düzeyde karşılaşılan en ciddi meselelerden biri, azalan enerji kaynaklarının varlığıdır. Enerji, üretim faaliyetlerinde önemli bir maliyet faktörü olarak öne çıkmakta ve ek olarak çevresel kirliliğin artmasına neden olmaktadır [1]. Yukarıda belirtilen nedenler, enerji sektöründe sürdürülebilir ve ekolojik açıdan zararsız çözümlere olan talebi artırmıştır. Bu bağlamda, sürdürülebilirlik ve çevresel etkileri göz önünde bulundurarak, alternatif enerji kaynaklarına yönelik artan bir ilgi ve yoğun araştırma çabası gözlemlenmektedir [2]. Ayrıca, geleneksel enerji kaynaklarının piyasadaki rekabeti, yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar ve hızla tükenen rezervler gibi olumsuzluklar, alternatif yakıt kaynaklarına olan arayışı hızlandırmaktadır [3]. Alkol, bitkisel yağlar ve biyodizel gibi yenilenebilir enerji kaynakları, enerji ihtiyaçlarını karşılama ve emisyon değerlerini düşürme açısından uygun bir alternatif olarak değerlendirilmektedir [4]. Biyoyakıtlar, biyolojik olarak parçalanabilme, düşük aromatik ve kükürt içeriği gibi özelliklerle sürdürülebilirlik avantajları sunmaktadır. Bu yakıtlar, özellikle düşük karbon ayak izi ve sürdürülebilir özellikleri sayesinde önem kazanmaktadır. İçten yanmalı motorlarda, dizel yakıtına bir alternatif olarak kabul edilen biyodizel, bu tür yakıtlar arasında dikkat çekici bir konuma sahiptir [2]. Dizel yakıtlarla benzer özelliklere sahip olmaları, sıvı formda bulunmaları ve mevcut yakıtlarla karıştırılarak kullanılabilir olmaları, bu yakıtlara önemli avantajlar kazandırmaktadır [5]. Yaklaşık %10 oksijen içermesi yanma sürecini iyileştirmekte ve HC, partikül madde (PM), karbondioksit (CO₂) ve CO gibi egzoz gazı emisyonlarının azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Buna karşın, düşük enerji değeri ve setan indeksi, petrol bazlı dizel yakıtı kıyasla %8-10 daha az maksimum motor torku üretme gibi biyodizelin bazı sınırlılıkları arasında yer almaktadır [5,6]. Biyodizel yakıtlarının yanma verimliliğinin artırılması amacıyla çeşitli yöntemler mevcut olmakla birlikte, son zamanlarda NP'lerin katkı maddesi olarak dizel motorlarında kullanılması öne çıkan bir yaklaşım haline gelmiştir. NP'ler, hacimlerine kıyasla geniş yüzey alanları ve yüksek kimyasal tepkime kapasiteleri ile dikkat çekmektedir [6,7]. NP'ler, sıvı yakıtlar içerisinde atomizasyon sürecini geliştirerek, optimal hava-yakıt karışım oranlarının oluşumuna katkıda bulunurlar [8,9].

Sonuç olarak, bu çalışma, nanopartiküllerin (NP'ler) dizel ve biyodizel karışımli yakıtlara katkısıyla motor performansının, emisyon azaltımının ve yanma verimliliğinin iyileştirilmesi potansiyelini detaylı bir şekilde incelemektedir. İtalya, Yunanistan, Suriye, Türkiye, Tunus gibi birçok Akdeniz ülkesinde yaygın olarak bulunan yabani bir tür bitki olan [10,11] Menengiç (Pistacia terebinthus) ağacı meyvelerinden elde edilen yağın esterifikasyon ve transesterifikasyon işlemleri sonucu üretilen biyodizele, litre başına 150 mg nano boyutlu MgO eklenmesi ve bu karışımın dizel test motorunda değerlendirilmesi, literatürdeki mevcut çalışmalara yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu araştırmanın, dizel motor teknolojisinde NP'lerin kullanımının önemini vurgulaması ve alternatif yakıt kaynaklarının geliştirilmesine yönelik potansiyel katkıları literatürdeki boşluğu doldurarak, sürdürülebilir enerji çözümlerine önemli bir katkı sağlaması beklenmektedir. Elde edilen bulgular, 1500 rpm sabit motor devri ve çeşitli motor yüklerinde yapılan testler sonucunda, referans yakıt değerleri ve mevcut literatürle karşılaştırılmış, böylece çalışmanın yeniliği ve literatürdeki önemi daha vurgulu bir şekilde ifade edilmiştir. Bu çerçevede, NP katkılı yakıt karışımlarının motor performansına, emisyon azaltımına ve yanma verimliliğine etkileri üzerine yapılan bu araştırma, hem teorik hem de pratik açıdan önemli katkılar sunmaktadır.

2. Materyal ve Metot

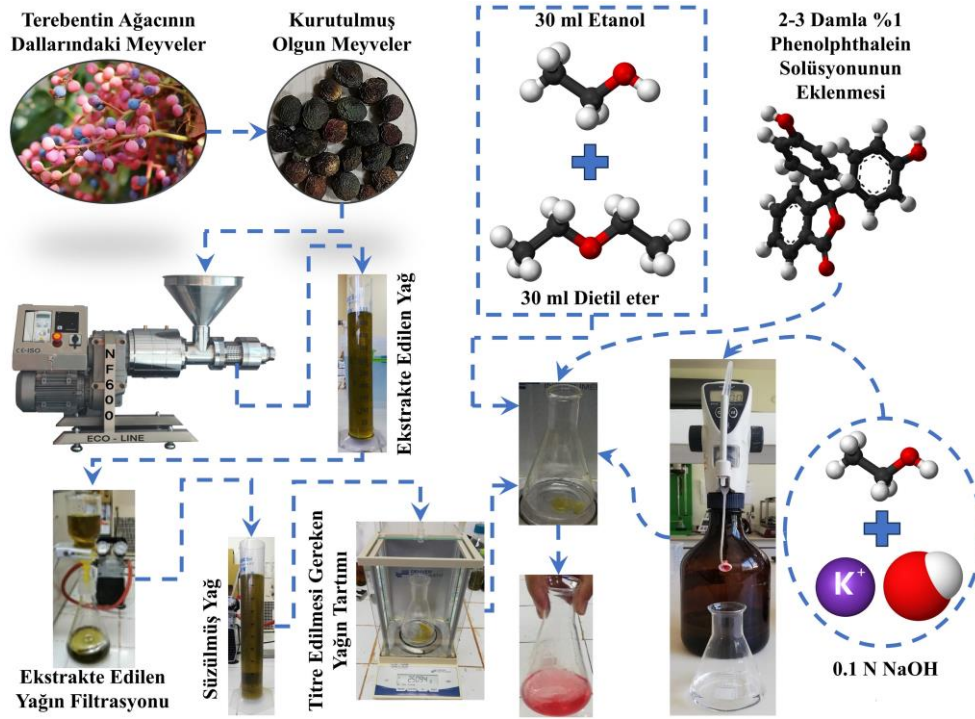
Bu çalışmada biyodizel üretimi amacıyla kullanılan TY, Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde, 41° 57' doğu boylamı ve 37° 55' kuzey enlemi koordinatlarında konumlanan Siirt ilinde bulunan, ticari olarak faaliyet gösteren bir işletmeden temin edilmiştir. İlgili işletme, piyasaya sunduğu yağları, soğuk pres yöntemiyle üretmektedir. Araştırmada kullanılan kimyasal maddeler; %1 Phenolphtalein Çözeltisi, Diethyl Eter (C₂H₅)₂O, Etanol (C₂H₅OH), Metil Alkol (CH₃OH), Sodyum Hidroksit (NaOH) ve Sülfürik Asit (H₂SO₄), Merck markası altında sağlanarak kullanılmıştır.

2.1. Terebentin yağının serbest yağ asiti (SYA) tayini

TY'nin biyodizele dönüştürülmesi sürecinde, yağdaki SYA yüzdesi, ölçümü için 2,5 gram yağa 2-3 damla %1 Phenolphtalein Çözeltisi eklenerek 0.1N NaOH solüsyonu ile titrasyon yapılması sonucunda tespit edilmiştir. Şekil 1'de belirtildiği üzere, çözeltilinin rensiz durumdan pembe renge dönüşmesiyle titrasyon işlemi tamamlanmış ve serbest %SYA Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\%SYA = \frac{V \times 0.028 \times 100}{m} \quad (1)$$

Burada, SYA, Serbest Yağ Asitleri yüzdesini (%), V, 0.1 N NaOH'un hacmini (ml) ve m ise terebentin yağı kütlesini (g) ifade etmektedir.



Şekil 1. Terebentin ağacı meyvelerinden yağ ekstraksiyonu ve titrasyon işlemi

Biyodizel üretim prosedüründe SYA seviyelerinin ölçülmesi, üretim kalitesi, işlem verimliliği ve ekonomik etkinlik açısından hayati bir denetim mekanizması olarak ön plana çıkmaktadır. Bu tespitler, işlem parametrelerinin optimize edilmesine, uygun ekipman seçimine ve katalizör seçimlerine yönelik kararların alınmasına önemli katkılar sağlayarak, biyodizel üretiminin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaktadır. Yükselen SYA seviyeleri, alkali katalizörlerle yürütülen tek aşamalı transesterifikasyon sürecinin zorlaşmasına neden olabilir ve metil esterlerin formasyonunu negatif yönde etkileyebilir. Esterifikasyon işlemi sonrası SYA düzeylerinin düşürülmesi, transesterifikasyon sürecinin daha etkin bir biçimde gerçekleşmesine imkân sağlar. Van Gerpen'in [12] yürüttüğü çalışmada, SYA düzeyinin %5 veya daha yüksek olduğu durumlarda, biyodizel sentezinden önce esterifikasyon işleminin gerçekleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, TY örneğinin SYA düzeyi, titrasyon metodolojisi kullanılarak ve Denklem (1) yardımıyla %5,8 olarak belirlenmiştir.

2.2. Terebentin yağının gaz kromatografisi-kütle spektrometresi (GC-MS) analizi

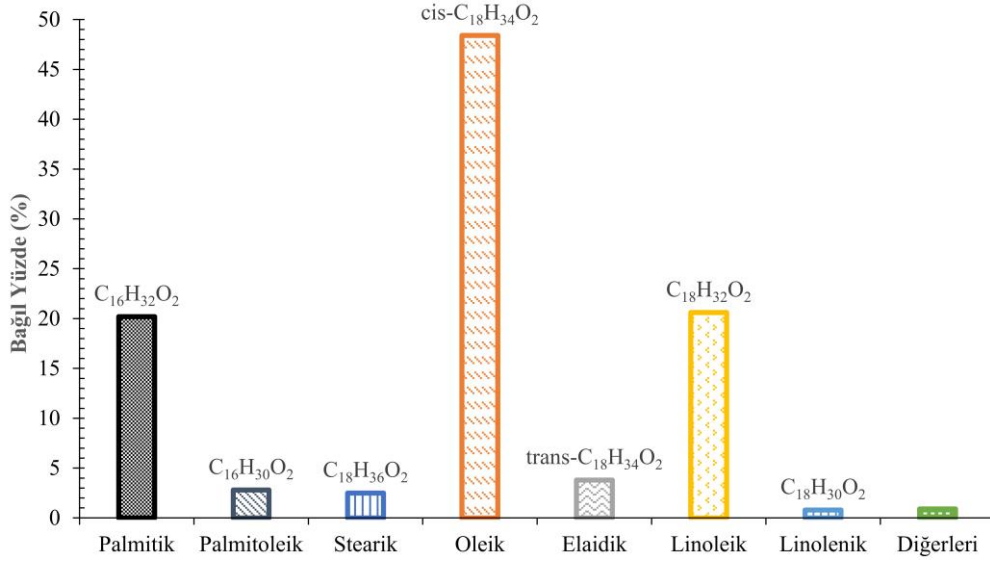
Araştırmamızda, biyodizel sentezi için kullanılan Terebentin meyvesinden elde edilen ham yağın bileşenlerinin nispi oranlarını saptamak üzere GC-MS analizi uygulanmıştır. %10 (h/h) hekzan içinde hazırlanan örneğin 40:1 bölütlenme oranında 1 µL'si cihaza enjekte edilmiş ve analiz işlemi bu parametreler altında gerçekleştirilmiştir.

Biyoyakıt üretiminde kullanılan bitkisel veya hayvansal kökenli yağların yağ asidi kompozisyonları, üretilen yakıtın kinematik viskozite, oksidasyon stabilitesi, setan indeksi gibi kritik özelliklerini belirlemede önemli bir role sahiptir. Bu özellikler, biyodizel üretiminde elde edilen yağ asidi metil esterlerinin (YAME) profili ile doğrudan ilişkilidir. Stearik asit (C18:0), oleik asit (C18:1), linoleik asit (C18:2), linolenik asit (C18:3), palmitik asit (C16:0) ve palmitoleik asit (C16:1) içeren YAME profilleri, standart biyodizel üretimi için tercih edilen yağ asidi bileşimlerini temsil etmektedir. Bu bileşimler, biyodizelin temel standartlarını karşılayacak şekilde uygunluk sağlamaktadır.

TY'nin GC-MS analiz sonuçları Şekil 2'de gösterildiği üzere grafiksel olarak sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, doymuş yağ asitleri (DYA) arasında yer alan palmitik (C16:0) ve stearik (C18:0) asitlerinin toplamda bağlı yüzde olarak %22,7'lik bir orana sahip olduğu belirlenmiştir. Tekli doymamış yağ asitleri (TDYA) kategorisinde; palmitoleik (C16:1), oleik (cis-C18:1) ve elaidik (trans-C18:1) asitlerin toplam bağlı yüzdesi %55 olarak tespit edilmiştir. Çoklu doymamış yağ asitleri (ÇDYA) içerisinde linoleik (C18:2) ve linolenik (C18:3) asitlerin toplamı ise bağlı yüzde olarak %21,4'e karşılık gelmektedir. Bu veriler, analiz edilen TY örneğinin yağ asidi kompozisyonunun detaylı bir profilini sunmaktadır.

Bu çalışmada incelenen TY numunesinde, TDYA içerisinde oleik asit en yüksek orana sahip olup, tüm yağ asitleri içerisinde %48,4'lük bir paya ulaşmıştır. Bu bulgu, incelenen TY'nin ağırlıklı olarak doymamış yağ asitlerinden (%76,4 toplam bağlı yüzde) oluştuğunu göstermektedir. Elde edilen bu veriler, TY'nin yağ asidi bileşiminin,

biyodizel üretimi için tercih edilen yağ asitleri profiliyle uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, söz konusu TY, biyodizel sentezi bağlamında değerlendirildiğinde, potansiyel bir ham madde olarak önem taşımaktadır.



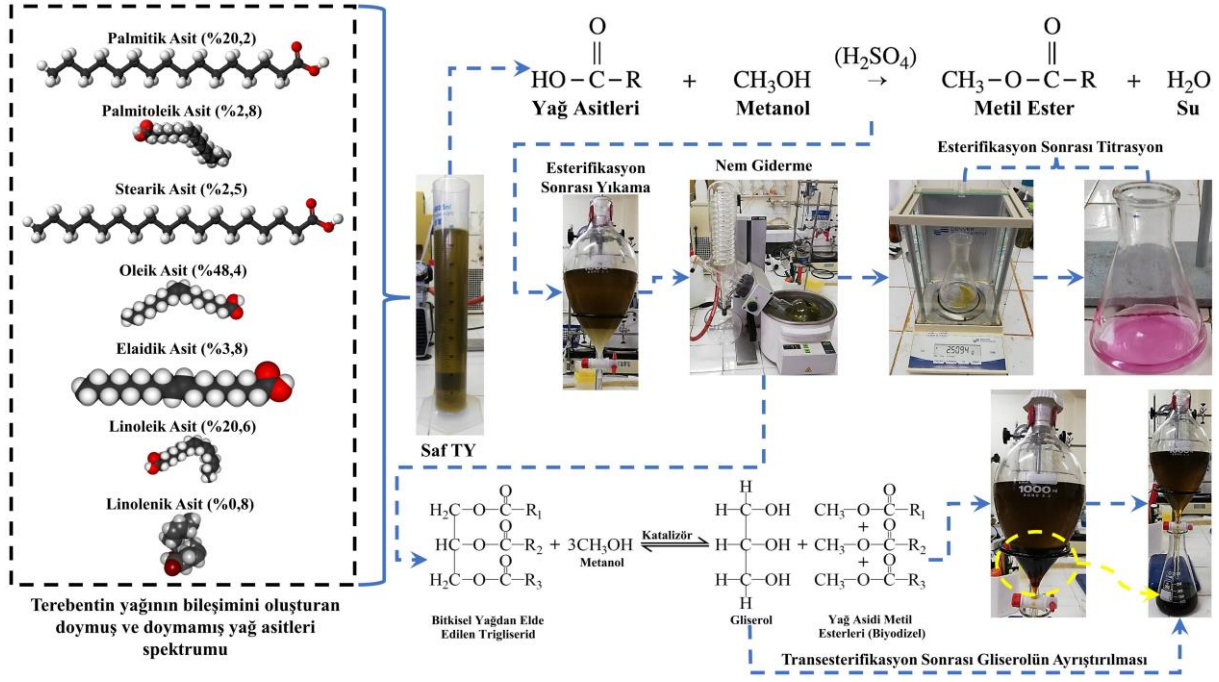
Şekil 2. TY numunesinin yağ asitleri bileşimi

2.3. Terebentin yağının biyodizel sentezlenmesi

Terebentin yağının SYA değerinin %5'in üzerinde olması, bitkisel yağın biyodizel dönüşürülmesi için iki basamaklı bir reaksiyon süreci (Esterifikasyon ve Transesterifikasyon) gerektiğini işaret etmektedir, bu durum Şekil 3'te açıkça gösterilmiştir.

Esterifikasyon aşamasında, 0,1 g H_2SO_4 ve 20 ml CH_3OH karışımıyla, toplam yağ hacminin %20'sine denk gelecek şekilde 100 ml yağ için bir çözelti hazırlanmıştır. Hazırlanan bu çözelti yağa eklenmiş ve karışım, 95 °C sıcaklıkta 3 saat süreyle reaksiyona tutulmuştur. Esterifikasyon süreci sonrasında gerçekleştirilen titrasyon analiziyle, SYA seviyesinin %2,24'e düşürüldüğü ve bu durumun transesterifikasyon süreci için uygun bir aralığa ulaştığı tespit edilmiştir.

Transesterifikasyon aşamasında, yağın metil esterlere dönüştürülmesi işlemi, CH_3OH ve potasyum hidroksit (KOH) katalizörü kullanılarak, yağ hacmine göre 6:1 oranında gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, literatürde önerilen koşullar ve Şekil 3'te özetlenen parametreler çerçevesinde, yağ kütlesinin %1'ine eşdeğer KOH katalizörü ve ham yağ hacminin %20'si kadar CH_3OH eklenerek 60°C'de ve 600 rpm karıştırma hızında 50-60 dakika boyunca yürütülmüştür [13,14]. Süreç sonucunda, üst katmanda biyodizel ve alt katmanda gliserol olmak üzere iki fazın oluştuğu gözlemlenmiştir. Gliserin ve biyodizelin ayrıştırılması için çeşitli ayırma ve yıkama işlemleri uygulanmıştır [15]. Biyodizel üretiminin genel prosesi Şekil 3'te şematik bir biçimde sunulmuştur.



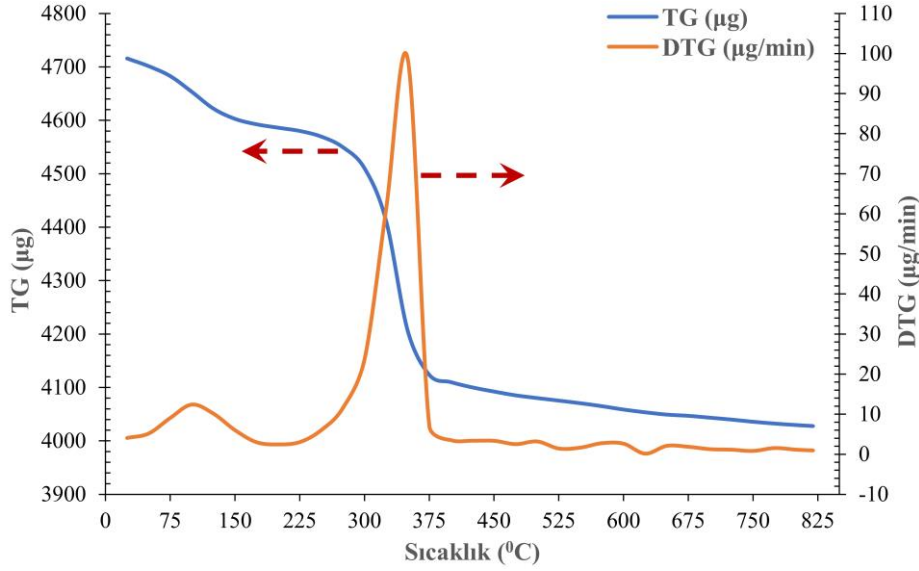
Şekil 3. Terebentin yağının biyodizele sentezlenmesi

2.4. Metal nano MgO'nun mikroskobik, elemental/spektral ve termal analizi

Metal nano MgO, geniş yüzey alanına sahip nanopartiküller ile tanımlanır ve bu özelliği, endüstriyel ve akademik uygulamalarda yüksek performansının altını çizer. Bu materyalin yüksek reaktivitesi, özellikle katalizörler ve kimyasal tepkimelerde kullanılmasını tercih edilen bir özellik haline getirir, bu da onu çeşitli disiplinlerde uygulanabilir kılar. Metal nano MgO'nun karakteristik özellikleri, Tablo 1'de ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

Tablo 1. Metal nano MgO özellikleri	
Özellikler	Değer
Safılık (%)	≥99,5
Renk	Beyaz
Ortalama parça boyutu (nm)	20-50
Özgül yüzey alanı (m ² /g)	>65
Morfoloji	Çok yüzlü
Kütle yoğunluğu (g/cm ³)	0,2
Gerçek yoğunluk (g/cm ³)	3,6

Termogravimetrik analiz (TGA), yakıt katkı maddesi olarak kullanılan metal nano MgO'nun termal kararlılığının incelenmesinde kritik bir yöntem olarak uygulanmıştır. Şekil 4, MgO'nun TGA analiz sonuçlarını içeren grafikleri detaylandırmaktadır. Bu analizde, MgO örneklerinin Termogravimetrik (TG) ve Diferansiyel Termogravimetrik (DTG) grafikleri elde edilmiş olup, söz konusu malzemelerin termal özellikleri ve bozunma paternleri hakkında derinlemesine bilgi sağlamaktadır. TG grafiği, örneğin sıcaklık arttıkça maruz kaldığı kütle kaybını ortaya koyarken, bu da MgO'nun termal bozunma sıcaklığını ve bu sıcaklıkta gerçekleşen kütle kaybının miktarını tespit etmede esas alınmaktadır. DTG grafiği ise, örneğin sıcaklık değişikliğine bağlı kütle kaybı hızını sergileyerek, MgO'nun maksimum bozunma hızına ulaştığı sıcaklığı ve bu sıcaklıkta bozunmanın potansiyel mekanizmalarını belirlemede kullanılmaktadır.

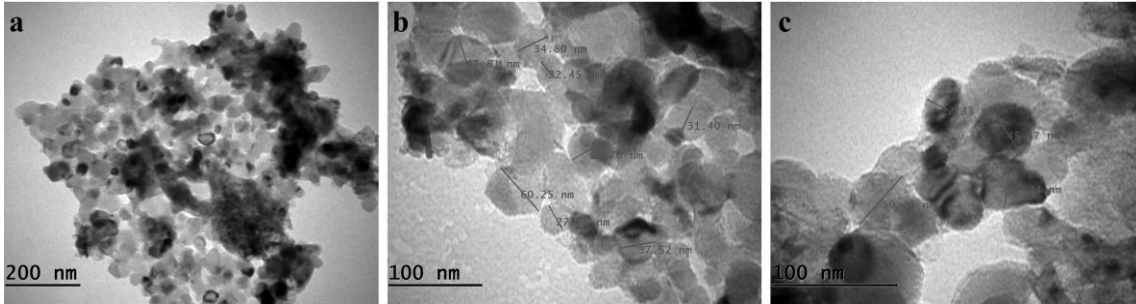


Şekil 4. Metal nano MgO'nun termogravimetrik analizi

Grafiklerde açıkça görüldüğü üzere, 25 °C'de MgO'nun oldukça stabil olduğu ve minimal düzeyde ağırlık kaybına maruz kaldığı belirlenmiştir. 100°C'de, suyun buharlaşması veya diğer volatil bileşenlerin elimine olması sonucunda hafif ağırlık kaybı müşahade edilmektedir. 300°C'de, malzemenin termal bozunmasını gösteren daha net bir ağırlık kaybı gözlenirken, 325-350 °C aralığında ağırlık kaybının miktarı ve hızı en üst düzeye ulaşmaktadır. 375 °C üzerindeki sıcaklıklarda ise ağırlık kaybının miktarı ve hızı neredeyse sabit bir hal almaktadır. Bu gözlemler ışığında, malzemenin termal kararlılığının, kusur oranları ve belirli bir dereceye kadar saflık seviyeleri dikkate alındığında, 300 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda muhafaza edilebileceği sonucuna varılabilir.

Bu çalışmada kullanılan metal nano MgO'lerin morfolojisini karakterize etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve transmisyon elektron mikroskobu (TEM) mikrografları elde edildi. SEM ve TEM görüntülerinde gösterildiği gibi, MgO mikroküreleri, kısmi aglomerasyonla birleştirilmiş gözenekli organizasyona sahip düzensiz fakat küresel parçacık benzeri şekiller sergiledi ve metal nano MgO'lerin çapı kabaca ortalama 40 nm olarak belirlendi.

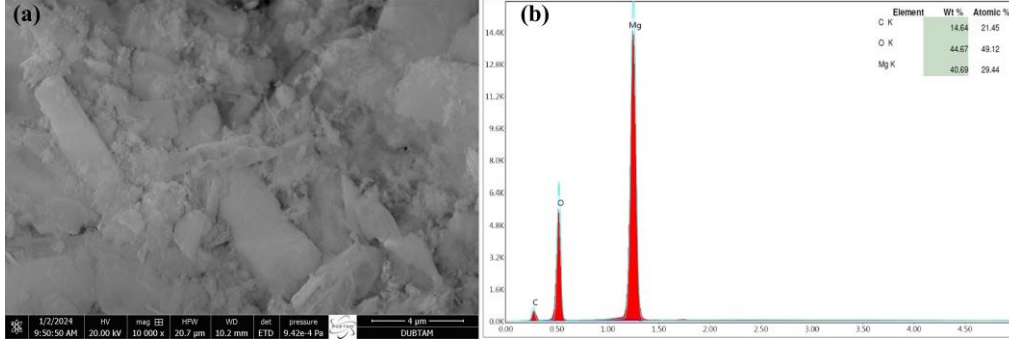
Şekil 5, MgO nanopartiküllerinin 120K, 300K ve 400K büyütme oranlarında TEM analizi sonuçlarını, 200 ve 100 nm'lik ölçek çubukları eşliğinde sunar. Bu analiz, partiküllerin boyut ve şekilleri gibi morfolojik özelliklerini ortaya koyar. Görüntüler, MgO'nun genellikle düzensiz, çokyüzlü yapıları ve yüzeylerinde dikkat çekici düzlemler ile keskin kenarlar sergilediğini belirtir, kristal yapının çeşitliliğine işaret eder. Şekil 5(a)'daki yoğun aglomerasyona karşın, Şekil 5(b) ve (c)'de daha az ve belirgin nanopartiküller, düşük aglomerasyon düzeylerini gösterir. Nanopartiküllerin ortalama boyutu yaklaşık 38 nm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5. Farklı büyütme oranları için MgO'lerin TEM görüntüsü: (a) 120 K, (b) 300 K ve (c) 400 K

Şekil 6, MgO örneğinin SEM-EDX analizini içermekte olup, Şekil 6(a) yüksek çözünürlüklü SEM ile metalik nano MgO'nun yüzey morfolojisini, Şekil 6(b) ise EDX spektroskopisi ile Mg ve O elementlerinin bulunurluğunu teyit eden profildir. SEM-EDX yöntemi, MgO'nun morfolojik ve kimyasal karakterizasyonunda etkili bir araç olarak değerlendirilir. SEM analizi, prizmatik yapıda büyük ve geniş yüzey alanına sahip MgO nanopartiküllerini detaylı bir şekilde göstermektedir. Bu yapılar, malzemenin yüzeyinde keskin kenarlar ve düzlemler oluşturarak belirgin bir kristallik yapıyı işaret etmektedir. Nanopartiküllerin boyut ve formu, özellikle katalitik uygulamalarda aktif yüzey alanını artırarak reaksiyon verimliliğini potansiyel olarak iyileştirebilir. İlave olarak, nanopartiküller arasındaki düşük aglomerasyon düzeyi, uygun dispersiyon ve yüksek reaktif yüzeylerin korunmasına katkıda

bulunur, bu da katalitik aktiviteyi ve verimliliği artırır. EDX analizi ile Mg ve O elementlerinin sırasıyla %40,69 ve %44,67 ağırlık yüzdesi, %49,12 ve %29,44 atomik yüzdesi ile varlığı doğrulanmıştır. Ayrıca, spektrumda görülen karbon, nanopartiküllerin sentez sırasında kullanılan organik moleküllerin bir izi olarak yorumlanabilir. Bu organik bileşenler, nanopartiküllerin oluşumu sırasında indirgeyici ve stabilize edici roller üstlenmiştir.

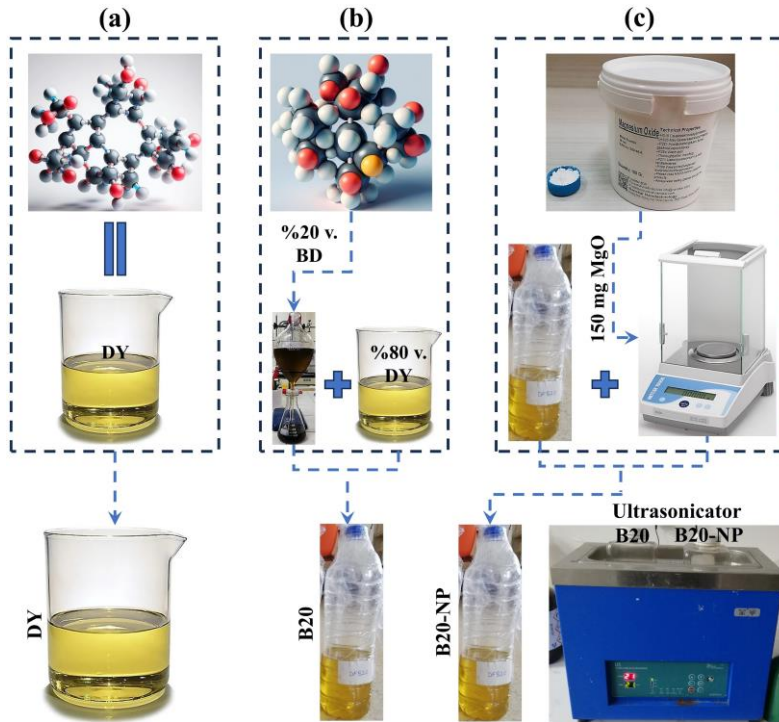


Şekil 6. (a) MgO'lerin SEM görüntüsü ve (b) MgO'lerin EDX Analizi

2.5. Test yakıtlarının hazırlanması

Bu çalışmada, DY referans yakıt olarak kullanılmış ve inorganik katkı maddesi olarak toksik olmayan ve kolaylıkla temin edilebilen MgO nanopartikülleri seçilmiştir. İlk olarak hazırlanan yakıt karışımı, %80 DY ve %20 biyodizelden oluşan B20 olarak adlandırılmıştır. İkinci karışım, B20-NP, aynı oranlarda DY ve biyodizel içermekte olup, ek olarak 150 mg/L MgO nanopartikül içerir.

Nano katkı maddelerinin biyodizel yakıtlar içerisinde etkin bir şekilde dağıtılabilmesi için ultrasonikasyon yönteminin kullanımı zorunludur. Metal nano MgO partikülleri, 150 mg/L konsantrasyonunda, dizel-biyodizel karışımına manyetik karıştırıcı yardımıyla ve ultrasonikasyon tekniği kullanılarak homojen bir şekilde entegre edilmiştir. Ultrasonikasyon prosesi, çeşitli parametreler altında gerçekleştirilmekte olup; bu parametreler arasında güç (120 W ile 220 W arasında değişmektedir), frekans (20 kHz'den 45 kHz'e kadar) ve süre (30 dakikadan 60 dakikaya kadar) bulunmaktadır [16–18]. İlgili çalışmada, nanopartiküllerin yakıt içerisinde homojen bir dağılımını sağlamak amacıyla, 160 W güç ve 40 kHz frekansta çalışan bir ultrasonik cihaz kullanılmış ve bu işlem 30 dakika süre ile uygulanmıştır. Bu prosedür, yakıt matrisi içerisinde nanopartiküllerin arzu edilen düzeyde homojen dağılımını elde etmek için gerçekleştirilmiştir. Yakıtın hazırlanma aşamaları Şekil 7'de, deney yakıtlarının özellikleri ise Tablo 2'de detaylandırılmıştır.



Şekil 7. Test yakıtlarının hazırlanması

Tablo 2. Test yakıtlarının özellikleri

Özellikler	Birim	DF	B100	B20	B20-NP	ASTM/EN Standart Değeri
Yoğunluk 15 °C	kg/m ³	836	870	841	831	EN 590:820-845 / ASTM D6751: 860-900
Viskozite 40 °C	mm ² /s	3,71	5,72	3,82	3,19	EN 590:2.0-4.5 / ASTM D6751: 1.9-6.0
Kalorifik Değer	MJ/kg	42,0	38,516	40,4	38,2	EN 590:42.5-43.0 / ASTM D6751: Min. 37
Setan Sayısı	-	48-55	59,68	-	-	EN 590: Min. 51 / ASTM D6751: Min. 47
Parlama Noktası	°C	59	106,5	83	74	EN 590: Min. 55 / ASTM D6751: Min. 130

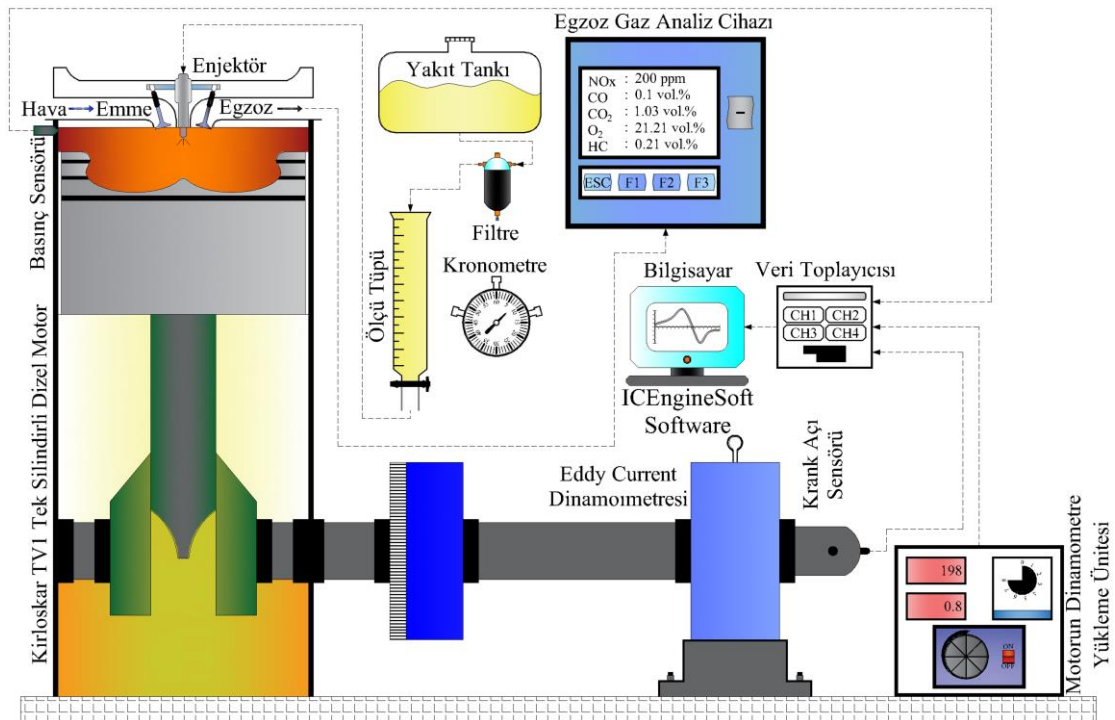
2.6. Egzoz gazı analizörü, deneysel kurulum ve hesaplanan parametreler

Deneysel çalışmada CO, HC ve NO_x gibi emisyonları, teknik özellikleri Tablo 3'te verilen Testo 350 yanma gazı analizörü kullanılarak ölçülmüştür.

Tablo 3. TESTO 350 gaz analizör cihazının teknik özellikleri

Ölçülen parametre	Ölçüm aralığı
CO	0-50 %hacim
HC	0-4000 ppm
NO _x	0-3000 ppm
CO ₂	0-50 %hacim
O ₂	0-50 %hacim

Bu araştırmada, 1500 rpm hızında çalışabilen ve maksimum 5.2 kW güç üretme kapasitesine sahip, 17.5 sıkıştırma oranına sahip atmosferik emişli, tek silindirli ve dört zamanlı Kirloskar TV1 dizel motoru, test yakıtlarının incelenmesi amacıyla tercih edilmiştir. Motor, sabit 1500 rpm hızında ve çeşitli yük koşulları altında değerlendirilmiştir. Yanma sürecinin analizi için piezoelektrik sensörlerden elde edilen veriler, sonrasında ICEngineSoft yazılımı ile değerlendirilmiştir. Motorun krank mili üzerindeki pistonun anlık konumu ve dönüş hızı, krank miline entegre edilmiş 360 eşit aralıklı relüktör ve bir krank açısı kodlayıcı aracılığıyla gerçek zamanlı olarak kayıt altına alınmıştır. Bu relüktör, her dönüş için 360 impulsluk sinyaller üreterek döner kodlayıcıya bilgi sağlar. Silindir içi basınç verilerinin döngüsel bütünlüğünü korumak amacıyla, bu veriler 0.1 derece krank açısı (°CA) çözünürlük ile izlenmiş ve ortalama olarak 100 motor döngüsü üzerinden analiz edilmiştir. Motor testleri, farklı fren ortalama efektif basınçları (BMEP) altında - Yüksüz, 1.0 bar, 2.0 bar ve 3.0 bar - ve sabit 1500 rpm hızında yürütülmüştür. Deneyler, ilk olarak motor yüksüz iken ve standart dizel yakıtı kullanılarak başlatılmış; motor çalışma koşulları istikrara kavuştuktan sonra veri toplama işlemi gerçekleştirilmiş ve takiben test yakıtları ardışık olarak incelenmiştir. Araştırmada kullanılan test düzeneğinin detayları ise Şekil 8'de gösterilmiş olup, motorun teknik özellikleri Tablo 4'te sunulmuştur.



Şekil 8. Testlerin gerçekleştirildiği deneysel düzenek

Tablo 4. TESTO 350 gaz analizör cihazının teknik özellikleri

Ölçülen parametre	Ölçüm aralığı
Marka	Kirloskar TV1
Tip	Dikey dizel motor, 4 zamanlı, su soğutmalı, tek silindir
Silindir hacmi	661,45 cc
Çap & Strok	87,5 mm & 110 mm
Sıkıştırma oranı	17,5:1
Yakıt	Dizel
Nominal fren gücü	5.2 kW @ 1500 rpm
Ateşleme Sistemi	Sıkıştırma ile ateşleme
Enjeksiyon Zamanlaması	23° bTDC (nominal)
Enjeksiyon Basıncı	200 bar
Basınç Dönüştürücüsü	Piezoelektrik tip (Marka: KISTLER), Model-6056A31U20test plant pvt. Ltd)
Dinamometre	Eddy current tipi (Marka: SAJ test plant pvt. Ltd)
Krank Açısı Sensörü	Model 8.3700.1321.0360, Marka KUBLER

Deneyel emisyon değerlendirmeleri, yanma dinamikleri ve türetilen motor performansı ölçütleri üzerine bir belirsizlik değerlendirilmesi yürütülmüştür. Bu değerlendirmenin temel amacı, enstrümantasyonun kalibrasyonu, gözlemlerin doğruluğu ve spesifik çevresel koşullar altında uygulanan deneysel yöntemlerden kaynaklanabilecek olası hataları tanımlamak ve bu hataların büyüklüğünü ölçmektedir [19,20]. Bu analiz, deneysel bulguların bilimsel temellere dayanarak tekrarlanabilirliğini değerlendirme amacıyla gerçekleştirilmiştir. Anderson'un önerdiği hata dağılım yöntemine dayanarak, aletlerle ilişkili belirsizlikler üzerine kapsamlı bir inceleme yapılmıştır [21]. Bu metodoloji, belirsizliklerin matematiksel olarak hesaplanmasını sağlayan Denklem (2) ile desteklenmektedir.

$$\Delta U = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial U}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2} \quad (2)$$

Bu bağlamda, U, bağımsız değişkenlerle ilişkili olan bağımlı değişkeni ifade etmektedir. x_1, x_2, \dots, x_n , bağımsız değişkenler olarak kabul edilirken, $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ ise her bir bağımsız değişkenle bağlantılı belirsizlikleri temsil etmektedir. Kümülatif belirsizlik ΔU ile gösterilmektedir. Bu çalışmada belirlenen özgül belirsizlik değerleri Tablo 5'te ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Tablo 5. Kullanılan ölçüm ekipmanlarının belirsizlik yüzdesi [22] ve gaz analiz cihazı ile ölçülen parametreler

Motor Enstrümantasyonu ve Emisyon Parametresi	Enstrümantasyon Detayları	Örneklemedeki Belirsizlik Yüzdesi
Dinamometre (dahili hız ölçümü ile)	Eddy Current Tipi, Model: AG10, Saj Test Plant Pvt. Ltd.	±1.0
Yük Sensörü	Marka: Sensotronics Sanmar Ltd., Model: 60001	±0,2
Yük göstergesi	Marka: Selectron, Model: PIC152eB2	±0,1
Yakıt ölçüm cihazı (FMD)	Marka: Apex, Model: FF0.012	±1,5
Yakıt akış vericisi (FLT)	Diferansiyel Basınç Vericisi; Marka: Yokogawa, Model: EJA110-EMS-5A-92NN	±0,065
Silindir basınç sensörü	Piezo Sensör; Marka: PCB Piezotronics Inc, Model: HSM111A22	±0,1
Yakıt enjektörü basınç sensörü	Piezo Sensör; Marka: PCB Piezotronics Inc, Model: M108A02	±0,15
Krank açısı sensörü	Marka: Kubler-Almanya, Model: 8.3700.1321.0360	±0,2
Sıcaklık sensörü	Marka: Radix; Tip: RTD, PT100 ve Termokupl Tip K	±0,4
Sıcaklık vericisi	Marka: Wika, Model: T19.10.3K0e4NK-Z	±0,2
Hava akışı vericisi	Marka: Wika; Model: SL1	±0,5
CO	Emisyon Analizörü	±0,3
HC	Emisyon Analizörü	±0,1
NOx	Emisyon Analizörü	±0,5
CO ₂	Emisyon Analizörü	±0,3
O ₂	Emisyon Analizörü	±0,3

Deneyin toplam belirsizlik düzeyi, Tablo 5'te yer alan verilere dayanarak, Denklem (3) kullanılarak elde edilmiştir.

$$\Delta U_O = \sqrt{(\Delta U_{BP})^2 + (\Delta U_{CO})^2 + (\Delta U_{NOx})^2 + (\Delta U_{HC})^2 + (\Delta U_{O_2})^2} \quad (3)$$

Tablo 6. Hesaplanan parametrelerin toplam yüzde belirsizliği

Parametrenin hesaplanması	Ölçülen Değişkenler ve Parametreler	Ölçüm Aletlerinin % Belirsizliği	Hesaplama	Hesaplanan Parametrelerin Toplam % Belirsizliği
BP (fren gücü) [22]	Hız ölçüm birimi, yük sensörü ve yük göstergesi	$\pm 0,2, \pm 0,1$ ve $\pm 1,0$	$\sqrt{(0.2)^2 + (0.1)^2 + (1)^2}$	1,025
Emisyonlar	CO, HC, NOx ve O ₂	$\pm 0,3, \pm 0,1, \pm 0,5$ ve $\pm 0,3$	$\sqrt{(0.3)^2 + (0.1)^2 + (0.5)^2 + (0.3)^2}$	0,663

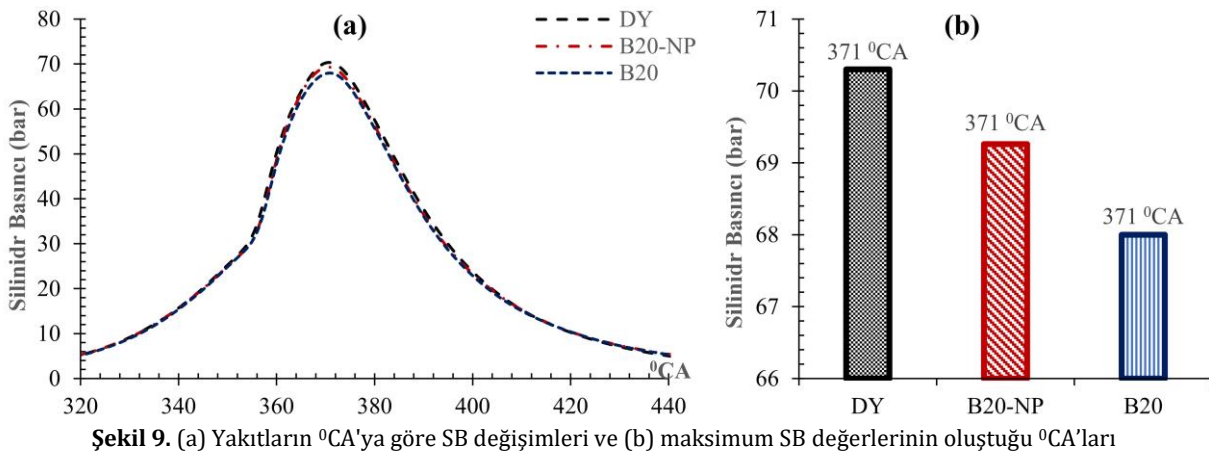
Tablo 6’da ifade edildiği üzere, hesaplanan toplam belirsizlik oranı %1,688 olarak tespit edilmiştir. Bu oran, mühendislik disiplinlerinde genel olarak kabul gören maksimum %5’lik belirsizlik sınırının altında yer almaktadır [23,24].

3. Bulgular

3.1. Yanma parametreleri

3.1.1. Silindir basıncı (SB) değişimleri

Deney yakıtlarının krank açısına (^oCA) bağlı SB değişimleri Şekil 9(a)’da, maksimum SB değerleri ve bu değerlerin elde edildiği ^oCA noktaları ise Şekil 9(b)’de sergilenmiştir. Şekil 9(a) ve Şekil 9(b)’nin analizi, B20 biyoyakıt karışımının maksimum SB değerinin diğer yakıtlara kıyasla en düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durumun, biyodizel karışımının düşük enerji içeriği ve yüksek viskozitesi ile ilişkili olduğu anlaşılmaktadır [25]. Enerji içeriğinin düşük olması ve viskozitenin yüksek olması, atomizasyonun zayıflamasına ve yakıtın yanışının optimal olmamasına yol açmaktadır. Gad ve Jayaraj [26] tarafından yapılan çalışmada, saf dizel yakıtına eklenen biyodizel oranının artışıyla benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. B20-NP yakıtının SB profilleri ve değerleri, B20’ye kıyasla daha yüksek bulunmuştur. B20-NP ile elde edilen artış, yanmayı kolaylaştıran ve yüksek yüzey alanına/hacim oranına sahip metal nanopartiküllerin eklenmesi sonucudur. Nanopartiküllerin yüksek yüzey alanı/hacim oranı [27], yanma sırasında oksijen ile daha yoğun etkileşime girerek atomizasyon ve buharlaşmayı hızlandırır, böylece yanma sürecini iyileştirir ve SB’yi artırır. Khan ve arkadaşları [28], nanopartikül ilavesinin katalitik etkisinin yanmanın erken başlamasını ve hızlı genişlemesini tetikleyerek SB’nin artmasına olanak tanıdığını bildirmiştir. Öte yandan, Khatri ve Goyal [29], silisyum dioksit (SiO₂) nanomalzemelerin yakıtı ilavesiyle yanma ve ateşleme performansında gözle görülür iyileşmeler kaydedildiğini, SiO₂ nanomalzemelerinin önceden karıştırılmış yanma hızını artırarak SB’yi yükselttiğini rapor etmişlerdir.

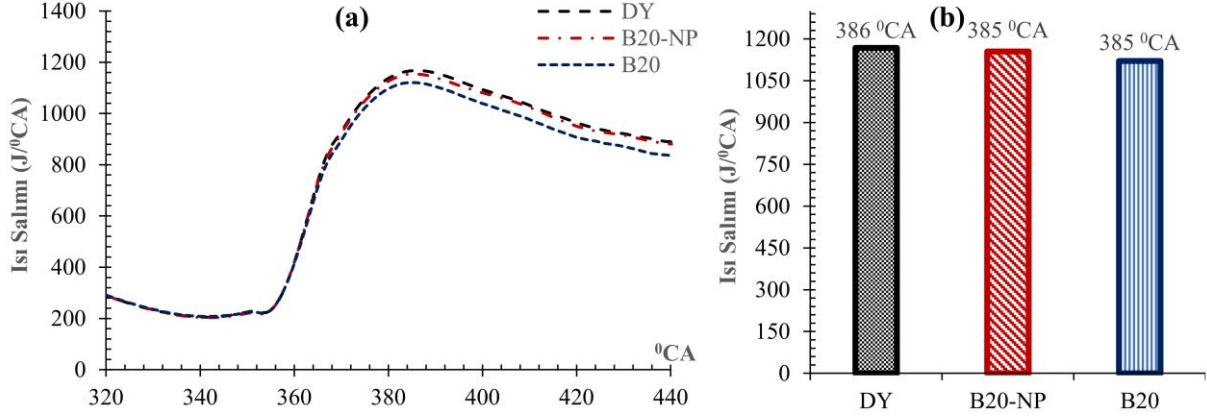


Şekil 9. (a) Yakıtların ^oCA’ya göre SB değişimleri ve (b) maksimum SB değerlerinin oluştuğu ^oCA’ları

3.1.2. Isı salımı oranı (ISO) eğrileri

Deney yakıtlarının ^oCA’ya bağlı ISO değişimleri Şekil 10(a)’da, maksimum ISO değerleri ve bu değerlerin elde edildiği ^oCA noktaları ise Şekil 10(b)’de sergilenmiştir. Şekil 10(a) ve Şekil 10(b)’nin analizi, B20 biyoyakıt karışımının maksimum ISO değerinin diğer yakıtlara kıyasla en düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Biyodizelin fizikokimyasal özellikleri, atomizasyon ve buharlaşma süreçlerinde zorluklar meydana getirir ve bu durum yanma reaksiyonlarında ısı salımını negatif yönde etkiler. B20-NP yakıtına nanopartikül ilavesinin, standart B20 yakıtına

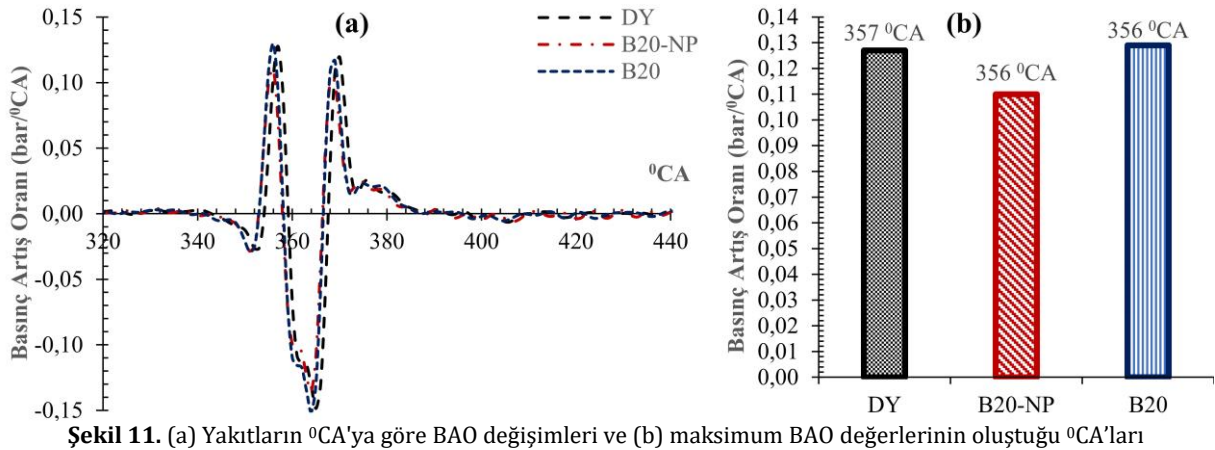
kıyasla ISO artırdığı gözlemlenmiştir. Mevcut literatür, nanopartikül eklemenin ISO üzerindeki pozitif etkisini belgeleyen çok sayıda çalışmayı içermektedir [30,31]. Nanopartiküllerin katkısıyla elde edilen yüksek ISO, geliştirilmiş termal özellikler, artırılmış yüzey alanı/hacim oranı ve ısı transferi sayesinde gerçekleşmektedir. Nanopartiküllerin sağladığı avantajlar, kısa ateşleme gecikmesi, iyileştirilmiş atomizasyon ve artırılmış buharlaşma hızı gibi, ısı salınımindaki artışa katkıda bulunur. Nanopartiküllerin kullanımının atomizasyon ve oksidasyon sürecini iyileştirdiğini ve bu yolla yanma sürecinde ISO'da artışa neden olduğu düşünülmektedir. Ek olarak, Kumar ve arkadaşları [32], nanomalzemelerin dizel motorlarındaki termodinamik özellikleri, ısı transfer hızını, katalitik reaktiviteyi ve yakıt karışımı stabilitesini iyileştirerek yanma parametrelerinde önemli gelişmeler sağladığını rapor etmiştir.



Şekil 10. (a) Yakıtların °CA'ya göre ISO değişimleri ve (b) maksimum ISO değerlerinin oluştuğu °CA'ları

3.1.3. Basınç artış oranı (BAO) eğrileri

Deney yakıtlarının °CA'ya bağlı BAO değişimleri Şekil 11(a)'da, maksimum BAO değerleri ve bu değerlerin elde edildiği °CA noktaları ise Şekil 11(b)'de sergilenmiştir. Şekil 11(a) ve Şekil 11(b)'nin analizi, B20 biyoyakıt karışımının maksimum BAO değerinin diğer yakıtlara kıyasla en yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. B20 yakıtının kullanımıyla sağlanan bu artış, yakıtın viskozitesi ve atomizasyonun zayıf olması nedeniyle ön yanma sürecinin uzaması ve buna bağlı olarak dolgu hacminin artışına dayanabilir [33]. Nanopartiküller katalitik etkileri sayesinde yakıtın daha etkin yanmasını sağlamaktadırlar. Deney yakıtları arasında, partikül katkısı içeren B20NP yakıtının, B20 yakıtına göre daha az basınç artışı sunduğu gözlemlenmektedir. Nanopartiküllerin kullanımı, tutuşma gecikme süresini kısaltmaktadır. Bu kısa tutuşma gecikme süreci, premiks yanmada daha az dolgu yanması sağlayarak basınç artış hızını azaltmıştır. Bu avantajlar özellikle, yakıtın hızlandırılmış yanmasını destekleyen nanopartiküllerin katalitik etkilerine atfedilmektedir [32].

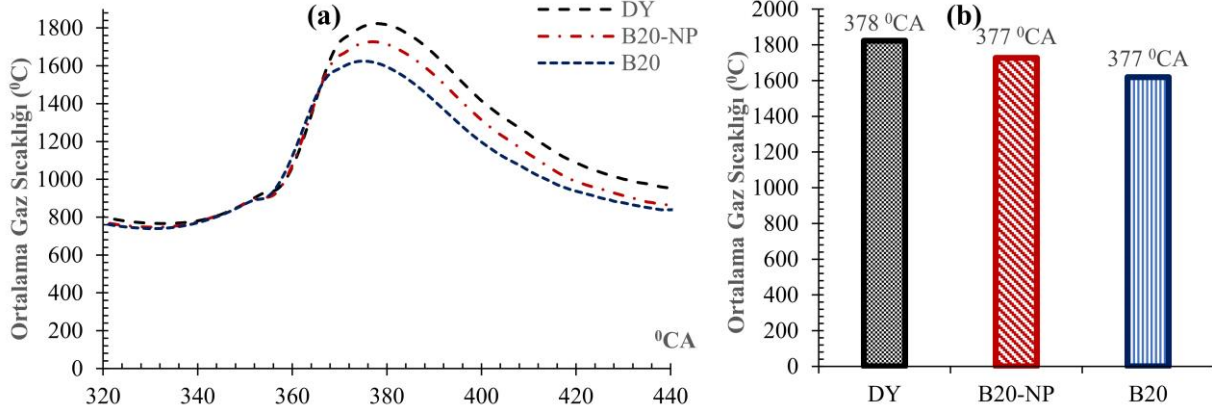


Şekil 11. (a) Yakıtların °CA'ya göre BAO değişimleri ve (b) maksimum BAO değerlerinin oluştuğu °CA'ları

3.1.4. Ortalama gaz sıcaklık (OGS) eğrileri

Deney yakıtlarının °CA'ya bağlı OGS değişimleri Şekil 12(a)'da, maksimum OGS değerleri ve bu değerlerin elde edildiği °CA noktaları ise Şekil 12(b)'de sergilenmiştir. Şekil 12(a) ve Şekil 12(b)'nin analizi, B20 biyoyakıt karışımının maksimum OGS değerinin diğer yakıtlara kıyasla en düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Motorlardaki OGS, motorun işletim koşulları, yük durumu, yanma verimliliği ve tercih edilen yakıt türü gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak farklılık gösterir. OGS, motorun yanma odasındaki yanma işlemleri sonucu meydana gelen sıcaklık değişikliklerini yansıtır ve böylece motorun performansına etki eder. Nanopartikül ilaveli B20-NP yakıtı,

B20 yakıtına göre %3,12 daha yüksek bir OGS sağlamıştır. Nanopartiküllerin yakıt içerisindeki homojen dağılımı, ateşleme kalitesini ve yanma hızını iyileştirir, bu da OGS'nin artmasına neden olur. Bunun yanı sıra, nanopartiküllerin kullanılması, yanma sürecindeki ısı salım hızını da etkileyebilir. Daha hızlı yanma işlemi, genellikle daha yüksek sıcaklıklara sebep olur ve bu da motorun OGS'sini doğrudan etkiler.

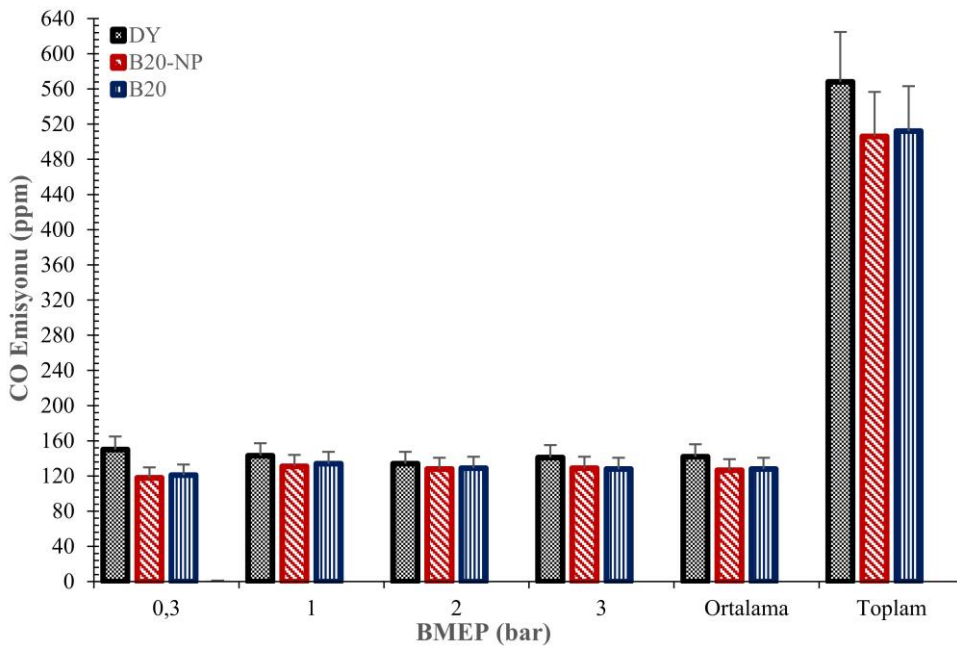


Şekil 12. (a) Yakıtların °CA'ya göre OGS değişimleri ve (b) maksimum OGS değerlerinin olduğu °CA'ları

3.2. Emisyon parametreleri

3.2.1. CO emisyon değişimleri

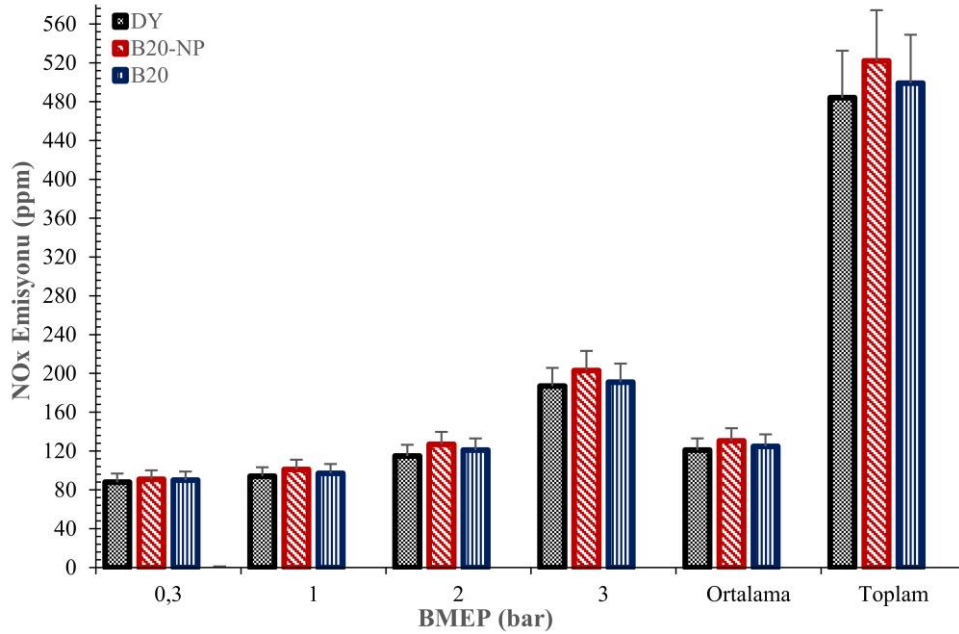
Test yakıtlarının BMEP ile ilişkili CO emisyon seviyeleri Şekil 13'te gösterilmiştir. CO, yanma sürecinde karbon atomlarının tam yanmaması ve kısmen oksitlenmesi sonucu oluşan bir ara üründür [33]. Dizel motorlar yüksek hava fazlalığı katsayısı ile çalıştıkları için genellikle düşük CO emisyon değerlerine sahiptir [34]. Bununla birlikte, dizel motorlarda yük miktarı, egzoz gazlarının bileşimi ve sıcaklığı üzerinde önemli etkilere sahiptir [35]. Motor yükü arttıkça, CO miktarında bir artış görülmektedir [36]. Bu, yük artışıyla karışımın zenginleşmesi ve bu zengin karışımın oksidasyonu için gerekli zamanın yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır [37]. Oksijen konsantrasyonu ve oksidasyon hızı, CO salınımının ana belirleyicileridir [38], zira CO, eksik yanmanın bir sonucudur. Test edilen yakıtlar arasında, B20 yakıtının CO emisyon seviyesinin, dizel yakıtına kıyasla %10,93 daha düşük olduğu saptanmıştır. Bu, biyodizelin yüksek oksijen içeriği sayesinde hava-yakıt karışımını ve yanma verimliliğini iyileştirmesinden ötürüdür. Nanopartikül katkı B20-NP yakıtının CO emisyon değeri, dizel yakıtına göre %12,25, B20 yakıtına göre ise %1,18 ppm daha düşük bulunmuştur. Nanopartikül ilavesi, geniş yüzey alanı, artırılmış kimyasal reaktivite ve iyileştirilmiş ateşleme özellikleri ile CO azalmasına katkı sağlar. Deviren ve Çılğın [39], nanopartikül katkısının yanma sürecinde oksidasyonu destekleyerek CO emisyonlarını azalttığını bildirmişlerdir.



Şekil 13. Test yakıtlarının BMEP'e göre CO emisyon değişimleri

3.2.2. NOx emisyon değişimleri

NOx terimi, nitrik oksit (NO) ve azot dioksit (NO₂) moleküllerinin toplam yoğunluğunu temsil etmektedir. Yanma süreçlerinden kaynaklanan NOx emisyonlarının çoğunluğu, NO şeklindedir. Zeldovich reaksiyon mekanizmalarına göre, 1300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, hava içindeki mevcut oksijenin maksimum limitine kadar ulaşana kadar yaklaşık 200.000 ppm (parça başına milyon) düzeyinde NO üretimi meydana gelir [40,41]. Test yakıtlarının BMEP ile ilişkili NOx emisyon seviyeleri Şekil 14'te gösterilmiştir. Dizel motorlarında NOx emisyonlarının oluşumu, oksijen konsantrasyonu, yanma sıcaklığı ve bu sıcaklıkta kalınan süre gibi çeşitli faktörlere dayanmaktadır [42]. NOx emisyonlarındaki varyasyonlar incelendiğinde, motor yükü ile orantılı bir şekilde artış eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Bu artışlar, yük altındaki artan yakıt tüketimi sonucu meydana gelen yüksek sıcaklıklarla ilişkilendirilebilir [43].

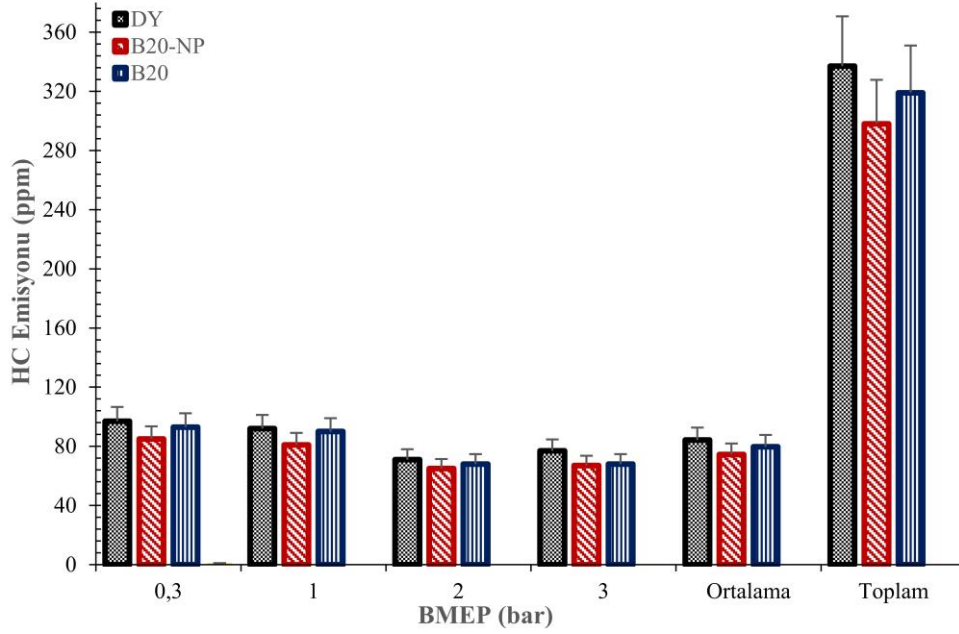


Şekil 14. Test yakıtlarının BMEP'e göre NOx emisyon değişimleri

Şekil 14'te belirtildiği üzere, B20 yakıtının NOx emisyon seviyesi, dizel yakıtıya kıyasla %3,09 oranında daha yüksektir. Bu artışın ana sebebi, biyodizelin dizel yakıtından daha fazla oksijen içermesidir. Biyodizel içerisindeki fazladan oksijen, yanma esnasında yerel sıcaklıkların yükselmesine ve dolayısıyla NOx oluşumuna katkı sağlamaktadır [43]. Tschakert ve ark. [44], biyodizel yakıtlarında gözlemlenen NOx artışının temel nedeninin yüksek doymamış molekül içeriği olduğunu ifade etmiştir. NP ilaveli B20-NP yakıtının, standart dizel yakıtına göre %7,85 ppm, B20 yakıtına kıyasla ise %4,60 ppm daha fazla NOx emisyonu ürettiği ve denenen yakıtlar arasında en yüksek NOx değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. B20-NP yakıtındaki nanoparçacıkların, yanma sürecini iyileştirerek sıcaklık değerlerinde önemli bir artışa sebep olduğu bilinmektedir [45]. Bu durum, metal nanoparçacıkların yanma sürecindeki etkili rolüne dikkat çekmektedir.

3.2.3. HC emisyon değişimleri

Test yakıtlarının BMEP ile ilişkili HC emisyon seviyeleri Şekil 15'te gösterilmiştir. Literatür taraması sonuçlarına göre, HC emisyonlarının ana kaynağı tamamlanmamış yanma süreçleridir. Şekil 15'te sunulan veriler ışığında, B20 yakıtının, dizel yakıtına kıyasla HC emisyonlarını %5,64 ppm oranında azalttığı tespit edilmiştir. Bu düşüş, biyodizelin sahip olduğu yüksek oksijen içeriği ve artırılmış setan sayısı sayesinde gerçekleşmektedir. Yüksek oksijen içeriği ve setan sayısı, tutuşma gecikmesini azaltarak yanmanın daha verimli gerçekleşmesini sağlar [28]. Ayrıca, Şekil 15'te belirtilen başka bir önemli bulgu, NP eklenmiş B20-NP yakıtının, dizel yakıtına göre %13,08 ve B20 yakıtına göre %7,04 ppm daha düşük HC emisyon değerleri elde etmesidir. Bu azalma eğilimi, biyodizel ve NP katkısının sağladığı ekstra oksijen içeriği ile NP'lerin yüksek yüzey alanı/hacim oranına bağlıdır. NP katkısı, yanma sürecini katalitik olarak geliştirerek HC emisyonlarında azalmaya yol açar. Bu etkileşim, nanoparçacık katkısının yanma mekanizmalarını optimize ederek ve yanma sırasında reaktanların daha etkin bir şekilde etkileşimini sağlayarak HC emisyonları üzerinde pozitif bir etki oluşturduğunu kanıtlar niteliktedir.



Şekil 15. Test yakıtlarının BMEP'e göre HC emisyon değişimleri

4. Tartışma ve Sonuç

Bu araştırmada, TY'nin biyodizelle dönüştürülmesi ve metal nano MgO eklenmesinin yanmaya ve emisyonlara etkileri ele alınmıştır. Analitik metodlar ve deney düzenekleri kullanılarak elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

Trebentin meyvelerinden yağ elde etmek amacıyla, belirlenen sıcaklık koşulları altında işlemler uygulanmış ve yağ soğuk pres yöntemi ile çıkarılmıştır. Esterifikasyon süreci sonucunda, yağın %SYA değeri %3'ün altına indirilerek biyodizel üretimi için uygun bir düzeye getirilmiştir. Yağ asidi profili, GC-MS analizi ile incelenmiş ve oleik asidin dominant komponent olduğu tespit edilmiştir, ki bu durum biyodizelin kalitesi açısından avantaj sağlamaktadır.

Transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve taramalı elektron mikroskobu-enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDX) analizleri, metal nano magnezyum oksit (MgO) partiküllerinin morfolojik ve kimyasal özelliklerini detaylı bir şekilde incelenmiştir. TEM analizi, bu nano partiküllerin düzensiz polihedral yapılar sergilediğini ve geniş yüzey alanlarına sahip olduklarını belirgin bir şekilde göstermiştir. Bu yapısal özellikler, partiküllerin yüksek reaktif yüzey alanına işaret eder, bu da onların katalitik ve reaksiyon özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Ek olarak, SEM-EDX analizi, MgO nano partiküllerinin yüzey kompozisyonu ve elementel dağılımını aydınlatmıştır. EDX spektrumları, magnezyum ve oksijen elementlerinin varlığını doğrulayarak, nano partiküllerin kimyasal bileşimini ve saflığını ortaya koymuştur. Bu iki analiz yöntemi kombinasyonu, nano MgO partiküllerinin detaylı bir karakterizasyonunu sağlayarak, ileriki uygulamalar ve araştırmalar için temel bir referans oluşturmuştur.

Deney yakıtlarının CO emisyonları üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, B20-NP formülasyonunun CO emisyonlarını belirgin şekilde azalttığı gözlenmiştir, bu durum nanopartiküllerin katalitik özelliklerine atfedilmektedir.

NOx emisyonları açısından, B20-NP formülasyonunun diğer deney yakıtlarına göre daha yüksek NOx değerleri ürettiği belirlenmiştir. Bu, nanopartiküllerin yanma sürecini hızlandırıcı etkisinin bir sonucu olarak NOx emisyonlarını artırabileceğini göstermektedir.

HC emisyonlarında ise, B20-NP formülasyonunun diğer yakıtlara kıyasla daha düşük HC emisyonları sağladığı tespit edilmiştir. Bu, biyodizel ve nanopartikül eklenmesinin yanma sürecini optimize ederek HC emisyonlarını azalttığına işaret etmektedir.

Ortalama gaz sıcaklığına ilişkin veriler, B20-NP formülasyonunun diğer yakıtlara göre daha yüksek ortalama gaz sıcaklığına ulaştığını göstermiştir, bu da nanopartiküllerin yanma sürecine olan iyileştirici etkisini yansıtmaktadır.

Silindir içi basınç değerleri, B20-NP formülasyonunun, B-20 standart yakıtına göre daha yüksek basınç değerleri sağladığını ortaya koymuştur. Bu, nanopartiküllerin yanma sürecine katalitik bir etki yaparak basınç artışına katkıda bulunduğunu göstermektedir. Diğer yanma parametreleri olan basınç artış hızı ve ısı salınım oranları

üzerinde yapılan değerlendirmeler, B20-NP formülasyonunun B-20 yakıtına kıyasla daha iyi performans sergilediğini belgelemiştir.

Araştırma sonuçlarımız, nanopartikül katkısının motor performansı ve emisyon karakteristikleri üzerinde birden fazla yönde etkiler sağladığını açıkça göstermektedir. Bu katkının, CO ve HC emisyonlarını belirgin şekilde azaltırken, aynı zamanda silindir içi basıncı ve ortalama gaz sıcaklığını artırdığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, nanopartikül katkısının yanma verimliliğini iyileştirebileceğine ve motor performansını olumlu yönde etkileyebileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, NO_x emisyonlarında gözlenen artış, nanopartikül katkısının yanma sürecine etkilerinin daha geniş ve karmaşık bir spektruma sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, nanopartikül katkısının yanma dinamikleri üzerinde olumlu etkilerin yanı sıra, dikkatli bir şekilde yönetilmesi gereken zorlukları da beraberinde getirebileceğini gösterir.

İleriki çalışmalarda, farklı nanopartikül konsantrasyonlarının, çeşitli yağ türleri ve işleme koşulları ile birlikte etkilerinin incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca, motor performansı ve emisyon etkilerinin yanı sıra, nanopartiküllerin ekonomik ve çevresel yönleri de ele alınmalıdır.


Kaynakça

- [1] Ulukardeşler A. 3. Nesil Biyoyakıt Teknolojisi Olan Alglerin Türkiye’de Üretilebilirlik Potansiyeli. Onuncu Ulus Kim Mühendisliği Kongresi,Koç Üniversitesi,İstanbul 2012:3–6.
- [2] Çılğın E. 3. Nesil Biyoyakıt Teknolojisi Alglerin bir Dizel Motorunda Performans ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Araştırılması. Iğdır Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü Derg 2015;5:33–41.
- [3] Gülüm M, Bilgin A, Çakmak A. Sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) kullanılarak üretilen misir yağı biyodizellerinin optimum reaksiyon parametrelerinin kariaştırılması. J Fac Eng Archit Gazi Univ 2015;30:503–11.
- [4] Imdadul HK, Masjuki HH, Kalam MA, Zulkifli NWM, Alabdulkarem A, Rashed MM, et al. Influences of ignition improver additive on ternary (diesel-biodiesel-higher alcohol) blends thermal stability and diesel engine performance. Energy Convers Manag 2016;123:252–64. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.040>.
- [5] ÇILGIN E, İLKILIÇ C. Mikroalg metil esterinin bir dizel motorunda, motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin araştırılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü Fen Bilim Derg 2015;31:68–72.
- [6] Ozsezen AN, Canakci M, Turkcan A, Sayin C. Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters. Fuel 2009;88:629–36. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.09.023>.
- [7] Mohd Noor CW, Noor MM, Mamat R. Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review. Renew Sustain Energy Rev 2018;94:127–42. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.031>.
- [8] Luo Y, Xu X, Zou JJ, Zhang X. Combustion of JP-10-based slurry with Nanosized aluminum additives. J Propuls Power 2016;32:1167–77. <https://doi.org/10.2514/1.B35969>.
- [9] Norhafana M, Noor MM, Hairuddin AA, Harikrishnan S, Kadirgama K, Ramasamy D. The effects of nano-additives on exhaust emissions and toxicity on mankind. Mater Today Proc 2020;22:1181–5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.110>.
- [10] Gercheva P, Zhivondov A, Nacheva L, Avanzato D. Transsexual forms of pistachio (pistacia terebinthus l.) from bulgaria - Biotechnological approaches for preservation, multiplication and inclusion in selection programs. Bulg J Agric Sci 2008;14:449–53.
- [11] Townsend CC, Davis PH. Flora of Turkey and the East Aegean Islands. vol. 28. Edinburgh University Press; 1973. <https://doi.org/10.2307/4119794>.
- [12] Van Gerpen J. Biodiesel processing and production. Fuel Process Technol 2005;86:1097–107. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.005>.
- [13] Deviren H, Çılğın E, Aydın S. Study on using nano magnesium oxide (MNMgO) nanoparticles as fuel additives in terebinth oil biodiesel blends in a research diesel engine. Energy Sources, Part A Recover Util Environ Eff 2023;45:12181–200. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2270559>.
- [14] Deviren H, Aydın H. Production and physicochemical properties of safflower seed oil extracted using different methods and its conversion to biodiesel. Fuel 2023;343:128001. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128001>.
- [15] Maheshwari P, Haider MB, Yusuf M, Klemeš JJ, Bokhari A, Beg M, et al. A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. J Clean Prod 2022;355:131588. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131588>.
- [16] Devarajan Y, Munuswamy DB, Mahalingam A. Influence of nano-additive on performance and emission characteristics of a diesel engine running on neat neem oil biodiesel. Environ Sci Pollut Res 2018;25:26167–72. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2618-6>.

- [17] Karthikeyan S, Prathima A. Environmental effect of CI engine using microalgae methyl ester with doped nano additives. *Transp Res Part D Transp Environ* 2017;50:385–96. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.028>.
- [18] Singh Rajpoot A, Choudhary T, Chelladurai H, Kumar Patel N. Effect of graphene nanoparticles on the behavior of a CI engine fueled with *Jatropha* biodiesel. *Mater Today Proc* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.785>.
- [19] Mani M, Nagarajan G. Influence of injection timing on performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine running on waste plastic oil. *Energy* 2009;34:1617–23. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.010>.
- [20] Devan PK, Mahalakshmi N V. Performance, emission and combustion characteristics of poon oil and its diesel blends in a DI diesel engine. *Fuel* 2009;88:861–7. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.11.005>.
- [21] Daş M, Aliç E, Kavak Akpınar E. Numerical and experimental analysis of heat and mass transfer in the drying process of the solar drying system. *Eng Sci Technol an Int J* 2021;24:236–46. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.10.003>.
- [22] Deb M, Paul A, Debroy D, Sastry GRK, Panua RS, Bose PK. An experimental investigation of performance-emission trade off characteristics of a CI engine using hydrogen as dual fuel. *Energy* 2015;85:569–85. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.108>.
- [23] Khan H, Soudagar MEM, Kumar RH, Safaei MR, Farooq M, Khidmatgar A, et al. Effect of nano-graphene oxide and n-butanol fuel additives blended with diesel-Nigella sativa biodiesel fuel emulsion on diesel engine characteristics. *Symmetry (Basel)* 2020;12. <https://doi.org/10.3390/SYM12060961>.
- [24] Duan X, Li Y, Liu J, Guo G, Fu J, Zhang Q, et al. Experimental study the effects of various compression ratios and spark timing on performance and emission of a lean-burn heavy-duty spark ignition engine fueled with methane gas and hydrogen blends. *Energy* 2019;169:558–71. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.029>.
- [25] İlkiliç C, Çilgin E, Aydın H. Terebinth oil for biodiesel production and its diesel engine application. *J Energy Inst* 2015;88:292–303. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.09.001>.
- [26] Gad MS, Jayaraj S. A comparative study on the effect of nano-additives on the performance and emissions of a diesel engine run on *Jatropha* biodiesel. *Fuel* 2020;267:117168. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117168>.
- [27] Haiter Lenin A, Azhagesan N, Berlin Selva Rex CR, Thyagarajan K. Performance of diesel engine operating with pongamia methyl esters as biodiesel. *Asian J Sci Res* 2012;5:153–61. <https://doi.org/10.3923/ajsr.2012.153.161>.
- [28] Khan TMY. Direct transesterification for biodiesel production and testing the engine for performance and emissions run on biodiesel-diesel-nano blends. *Nanomaterials* 2021;11:1–20. <https://doi.org/10.3390/nano11020417>.
- [29] Khatri D, Goyal R. Effects of silicon dioxide nanoparticles on the performance and emission features at different injection timings using water diesel emulsified fuel. *Energy Convers Manag* 2020;205:112379. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112379>.
- [30] Attai YA, Abu-Elyazeed OS, ElBeshbeshy MR, Ramadan MA, Gad MS. Diesel engine performance, emissions and combustion characteristics of castor oil blends using pyrolysis. *Adv Mech Eng* 2020;12:1687814020975527. <https://doi.org/10.1177/1687814020975527>.
- [31] Hojati A, Shirneshan A. Effect of compression ratio variation and waste cooking oil methyl ester on the combustion and emission characteristics of an engine. *Energy Environ* 2020;31:1257–80. <https://doi.org/10.1177/0958305X19893045>.
- [32] Kumar S, Dinesha P, Rosen MA. Effect of injection pressure on the combustion, performance and emission characteristics of a biodiesel engine with cerium oxide nanoparticle additive. *Energy* 2019;185:1163–73. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.124>.
- [33] İLKILIÇ C, ÇILGIN E. The Effect of Terebinth oil Methyl Ester on Engine Performance and Exhaust Emissions in a Diesel Engine. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü Derg* 2014;4:75–85.
- [34] Prabhu A, Venkata Ramanan M, Jayaprabakar J, Harish V. Experimental investigation of emission characteristics on ricebran biodiesel-alcohol blends in a diesel engine. *Int J Ambient Energy* 2021;42:1123–8. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1586768>.
- [35] Çilgin E. Analysis of the plant's biofuel ability obtained by natural hybridization. *Energy Sources, Part A Recover Util Environ Eff* 2021;43:1486–99. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1854392>.
- [36] HAZAR H, Uyar M, Aydın H, Şap E. The effects of apricots seed oil biodiesel with some additives on performance and emissions of a diesel engine. *Int J Automot Eng Technol* 2016;5:102–14. <https://doi.org/10.18245/ijaet.287176>.
- [37] Rakopoulos CD, Hountalas DT, Zannis TC, Leventis YA. Operational and environmental evaluation of diesel engines burning oxygen-enriched intake air or oxygen-enriched fuels: A review. *SAE Tech Pap* 2004;113:1723–43. <https://doi.org/10.4271/2004-01-2924>.
- [38] Yoon SH, Suh HK, Lee CS. Effect of spray and EGR rate on the combustion and emission characteristics of

- biodiesel fuel in a compression ignition engine. *Energy and Fuels* 2009;23:1486–93. <https://doi.org/10.1021/ef800949a>.
- [39] Deviren H, Çilgin E. Spectroscopic verification of biodiesel synthesis from turpentine tree oil through two-step chemical reactions: investigation of the use of synthesized biodiesel and acetone as fuel additives in diesel engines. *Energy Sources, Part A Recover Util Environ Eff* 2024;46:35–53. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2277363>.
- [40] Canakci M. Combustion characteristics of a turbocharged DI compression ignition engine fueled with petroleum diesel fuels and biodiesel. *Bioresour Technol* 2007;98:1167–75. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.05.024>.
- [41] Uyar M, Aydın H. Production of low sulfur diesel-like fuel from crude oil wastes by pyrolytic distillation and its usage in a diesel engine. *Energy* 2022;244:122683. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122683>.
- [42] Vijayakumar S, Mahadevan S, Arulmozhi P, Sriram S, Praseetha PK. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Atalantia monophylla* leaf extracts: Characterization and antimicrobial analysis. *Mater Sci Semicond Process* 2018;82:39–45. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.03.017>.
- [43] ÇILGIN E. Investigation of the pure use of microalg oil in diesel engines. *Int J Automot Eng Technol* 2022;11:1–8. <https://doi.org/10.18245/ijaet.874696>.
- [44] Tschakert P, Huber-Sannwald E, Ojima DS, Raupach MR, Schienke E. Holistic, adaptive management of the terrestrial carbon cycle at local and regional scales. *Glob Environ Chang* 2008;18:128–41. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2007.07.001>.
- [45] Arul Mozhi Selvan V, Anand RB, Udayakumar M. Effect of cerium oxide nanoparticles and carbon nanotubes as fuel-borne additives in diesterol blends on the performance, combustion and emission characteristics of a variable compression ratio engine. *Fuel* 2014;130:160–7. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.034>.

An Innovative Approach to Improve Point Location Detection System with ANFIS using RSSI Signals and Fingerprinting Method

Emre Yüksek*¹ , Ahmet Gürkan Yüksek² 

*¹ Sivas University of Science and Technology, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Computer Engineering, SIVAS

² Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Engineering, Computer Engineering, SIVAS

(Alınış / Received: 16.04.2024, Kabul / Accepted: 23.04.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

Keywords

Indoor Localization,
ANFIS,
Fingerprinting

Abstract: Localization systems have an important place in many areas. GPS (Global Positioning Systems) using data from satellites gives successful results in localization systems. However, localization systems such as GPS, which can be quite successful outdoors, do not achieve the same success indoors because the satellite viewing angle cannot be maintained continuously or due to low reception quality. In this respect, there is a need for localization systems that can provide the most precise localization with the least cost in the interior. This study aims to improve fingerprint-based localization systems, which is a localization method based on Received Signal Strength Indicator (RSSI) data using ANFIS. The proposed system has been shown to give more successful results than the methods frequently used in the literature.

RSSI Sinyalleri ve Fingerprinting Yöntemi Kullanılarak Noktasal Konum Algılama Sisteminin ANFIS ile İyileştirilmesine Yönelik Yenilikçi Bir Yaklaşım

Anahtar Kelimeler

İç Mekân Konumlandırma,
ANFIS,
Parmakizi

Öz: Konumlandırma sistemleri birçok alanda önemli bir yere sahiptir. Uydulardan gelen verileri kullanan GPS (Global Positioning Systems) yerelleştirme sistemlerinde başarılı sonuçlar vermektedir. Ancak GPS gibi dış mekânlarda oldukça başarılı olabilen konumlandırma sistemleri, uydu görüş açısının sürekli korunamaması veya sinyal alım kalitesinin düşük olması nedeniyle iç mekânlarda aynı başarıyı gösterememektedir. Bu bakımdan iç mekânda en az maliyetle en hassas konumlandırmayı sağlayabilecek konumlandırma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma, Alınan Sinyal Gücü Göstergesi (RSSI) verilerine dayalı bir konumlandırma yöntemi olan parmak izi tabanlı yerelleştirme sistemlerini ANFIS kullanarak geliştirmeyi amaçlamaktadır. Önerilen sistemin literatürde sıklıkla kullanılan yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

*İlgili Yazar, email: eyukse@ivas.edu.tr

1. Introduction

Recently, intelligent systems, representing a prominent facet of Information Systems, consist of electronic circuits enabling intercommunication among themselves and other user-oriented systems via various protocols. These systems are proficient in recognizing and aiding users through straightforward commands [1]. Furthermore, systems capable of pinpointing location data and offering decision support based on this data are regarded as integral components of intelligent systems [2], [3]. This functionality has given rise to applications commonly known as Location-Based Services (LBS) [4]. LBS encompasses a collection of IT services that connect the location of an entity with contextually relevant information in the vicinity of that entity [5].

Global positioning system (GPS) is one of the main positioning technologies. GPS is a satellite network that regularly sends coded information, measuring the distance between satellites and objects, making it possible to determine their precise location (with margin of error) on earth in real time. However, due to the significant loss in receiving satellite signals inside buildings, it is difficult to obtain reasonable positioning result when GPS is used indoors. Although GPS enables high accuracy location determination outdoors, it cannot provide the same success when direct line of sight (LOS) cannot be achieved with satellites. In this respect, the need for indoor positioning has become an increasing research focus.

Indoor positioning is an increasingly important technology because of the innovations and advanced features provided by the software and hardware systems of recent years and the context awareness is provided for applications that will work by sensing the location information of indoor environments. In addition, the rapid increase of mobile device users and associated information technologies in recent years also makes indoor positioning important [6]. However, current positioning systems cannot fully meet industrial requirements regarding safety, accuracy, functionality and usability [7].

As shown in Figure 1, the operation of an indoor positioning system consists of several steps. First, tags or mobile devices transmit the signals to sensors or receiving nodes, then data collected at sensors or receiving nodes is transmitted to a central data station, which calculates the locations of devices or tags using geolocation methods and algorithms, and finally the calculated location (x, y) along with its coordinates on a map in the user interface [8].

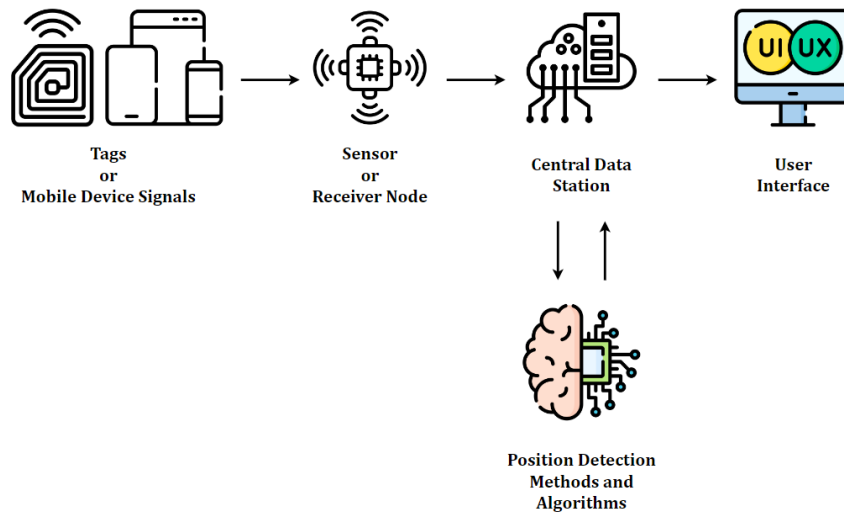


Figure 1. Indoor localization steps

In the field of indoor positioning, many different technologies such as Bluetooth, WiFi, RFID, Ultra-Wideband, Ultrasound and ZigBee, which are among the wireless communication technologies, are used and many different studies have been carried out in the field of indoor positioning with using these technologies in recent years [9], [10], [11].

In addition to the development of various technologies for indoor positioning, various methods have been extensively researched in the last two decades and a series of approaches have been developed [12]. Received Signal Strength Indicator (RSSI) determines the location according to the signal level reaching the receiver [13], Fingerprinting determines the location with the previously collected signal information [14], Angle of Arrival (AoA) determines the position by using the angle of arrival of the signals reaching the receiver [15], Time of Arrival (ToA) determines location using the signal propagation time [16], Time Difference of Arrival (TDoA) determines the location by using the difference between the arrival time of the emitted signals [17] and Triangulation uses the radial distance of the signal received from three different reference points [18] to determine the position.

When the literature is reviewed, it is seen that a great effort has been made to provide reliable and precise indoor positioning and a lot of research has been done.

Malavalli et al. [19] developed a Wi-Fi based indoor positioning system using RSSI information with fingerprint method and machine learning. The system estimates with the Bayesian model and tests are carried out in two different environments. In the first test, f-score of the machine learning model was 0.893 in a corridor with 14 reference points and in the second test, f-score of the machine learning model was 0.994 in a 6-room house. Mascharka et al. [20] aimed to find the best algorithm for indoor positioning by testing machine learning

algorithms with data from embedded sensors. They tested the data set consisting of 3110 data obtained from the real environment with 20 machine learning algorithms and found that the K* algorithm gave the best result with average error margin of 0.76 m. Salamah et al. [21] aimed to reduce computation time and increase performance of Wi-Fi based indoor location systems using machine learning approach in their study. They tested the performance of the system they proposed with k-Nearest Neighbor, Decision Tree, Random Forest and Support Vector Machine algorithms. The computation of the system reduced by 70% with Random Forest and 33% with k-Nearest Neighbor. Hsieh et al. [22] used Bluetooth technology and Android-based smart device in their machine learning approach system. They aimed to achieve a more successful result in indoor positioning by applying Kalman Filter algorithm to the RSSI information of the signals from the Bluetooth transmitters. They tested the system they developed with k-Nearest Neighbor, Support Vector Machines and Random Forest algorithms, and the model trained with k-Nearest Neighbor algorithm gave the most successful result. AlHajri et al. [23] developed a system based on two-step machine learning model to achieve higher accuracy position detection for indoor positioning. In the first step, the k-Nearest Neighbor algorithm was used to recognize the environment type, and in the second stage, the most appropriate combination of radio frequency properties was determined according to the defined environment type. In the study, real data obtained from the measured signals were used and the accuracy rate in position detection increased between 50% and 70%. Teran et al. [24] developed an indoor positioning system in which WiFi and Bluetooth technologies are used jointly within the framework of IoT. With the machine learning approach in the system, the location is determined by using the signal / noise ratio, RSSI information and fingerprint method. 4 Bluetooth transmitters and 5 WiFi access points were used in the system, and the accuracy rate in location detection increased by 75% with the k-Nearest Neighbor algorithm.

This study aims to develop an indoor positioning system that can learn the environmental situation from limited training data and provide accuracy close to existing indoor positioning systems, with less cost and shorter training time, using a machine learning approach and the Internet of Things. A model was developed using ANFIS algorithm with RSSI information of the signals received from Bluetooth transmitters in the simulation environment. The following parts of the study are presented as follows: Section 2 consists of the methodology used in the developed closed environment positioning system. Section 3 consists of developed models' results obtained. In Chapter 4, the study was concluded by discussing the results.

2. Material and Method

2.1. Fingerprinting

The fingerprinting method serves as a technique for ascertaining the location of an object or an individual by utilizing pre-acquired signal data. As shown in Figure 2, this method comprises two essential phases: the offline phase, which involves training, and the online phase, responsible for testing and location detection.

During the offline phase, signals from transmitters are gathered, and their Received Signal Strength Indicator (RSSI) information is recorded in vectors [25]. Each RSSI vector corresponds to a known location and is stored in a database for future reference during the online phase [18].

During the online phase, the individual or item of interest sends their RSSI data to a server. The server utilizes a positioning algorithm to gauge the location of the target by comparing the RSSI vector of the target with vectors stored in the database, using particular similarity metrics. Following this, the database provides the position that displays the greatest correlation with the vector transmitted by the server [18].

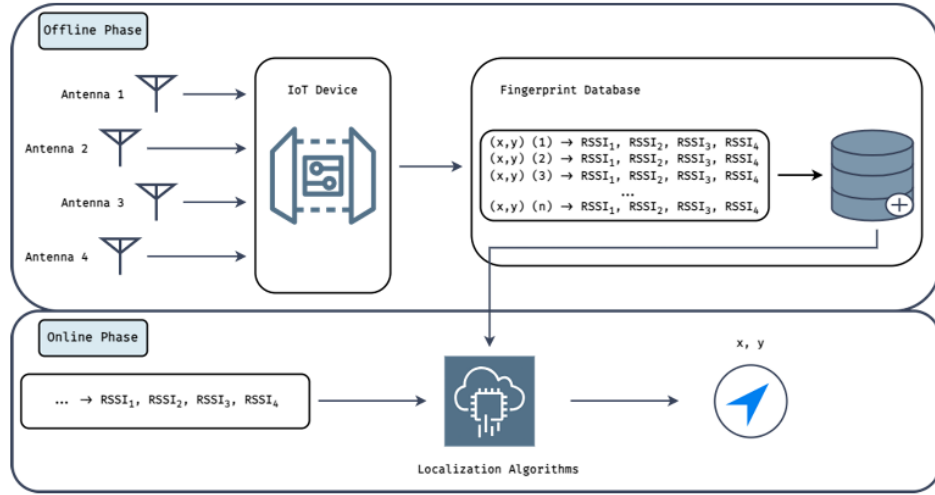


Figure 2. Fingerprinting method

2.2. Bluetooth

Bluetooth is a technology developed for wireless and short range transmission of voice and data between different fixed or mobile devices based on the IEEE 802.11.5 standard. Known as the newest version of Bluetooth technology, Bluetooth Low Energy (BLE) is a very suitable technology for indoor location determination, with a 24 Mbps data rate and 70-100 meters coverage area with higher energy efficiency compared to previous versions. In addition, diversity, low cost and energy efficiency are the advantages of BLE technology. The infrastructure of BLE technology generally consists of 1 type of device; BLE Beacon. The task of the beacons is to announce their presence periodically. BLE Beacons periodically emit a signal that all BLE supporting devices can receive. The content of this signal includes identification information (ID) and RSSI information.

2.3. ANFIS

The Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System (ANFIS) represents a class of artificial neural network systems founded on the principles of the Takagi-Sugeno fuzzy inference system. It was initially conceived by Jang in the early 1990s and gained recognition for its efficacy in modeling nonlinear functions and forecasting chaotic time series [26], [27].

The ANFIS network structure is characterized by the assembly of nodes, with each node assigned a specific function, and these nodes are distributed across various layers [28]. ANFIS methodology operates as a hybrid system that integrates fuzzy logic and artificial neural networks [29].

Within ANFIS, the framework encompasses If-Then rules and input-output information pairs inherent to the fuzzy inference system. Nevertheless, training and system control leverages learning algorithms associated with artificial neural networks [26], [30]. If x and y are input and z are taken as output, the basic rule structure of ANFIS is written as follows:

$$\text{If } x \in A_i \text{ and } y \in B_i \text{ Then } z_i = p_i x + q_i y + r_i$$

In this context, A_i and B_i serve as labels for the sets that partition the x and y variable space into fuzzy subspaces. Meanwhile, p_i , q_i and r_i represent the design parameters that are established through the training process. The variable z_i denotes the output value of a specific rule, and it is contingent on the input variables. Consequently, for any given input pair of x and y , the resultant output value is computed as the weighted average of z_i , which represents the output values generated by all the rules [31]. Based on the first order fuzzy Takagi-Sugeno model, ANFIS model is created based on the following two rules. In these rules p_i , q_i and r_i are equation constants for each rule [32].

$$\begin{aligned} \text{If } x = A_1 \text{ and } y = B_1 \text{ Then } f_1 &= (p_1 x + q_1 y + r_1) \\ \text{If } x = A_2 \text{ and } y = B_2 \text{ Then } f_2 &= (p_2 x + q_2 y + r_2) \end{aligned}$$

ANFIS architecture created using the above rules is shown in Figure 3 and consists of 5 layers. In the first layer, fuzzifying layer, fuzzification occurs, where membership functions are applied to the input data. This step

transforms the crisp input values into fuzzy values. The second layer, implication layer, is responsible for generating rules based on the principles of fuzzy logic inference. These rules dictate how the input variables relate to the output. In the third layer, normalization layer, a normalization process involving weighted averaging is applied to each node that originates from the rule layer. This step helps balance and normalize the information. The fourth layer, defuzzifying layer, serves to convert the fuzzy results obtained from the previous layers into numerical values. This is a crucial step in making the results suitable for further processing. In the fifth and final layer, combining layer, the output values from all nodes are combined or added together, resulting in a single output value for the ANFIS system. This aggregated value represents the system's output based on the input data and the fuzzy logic rules.

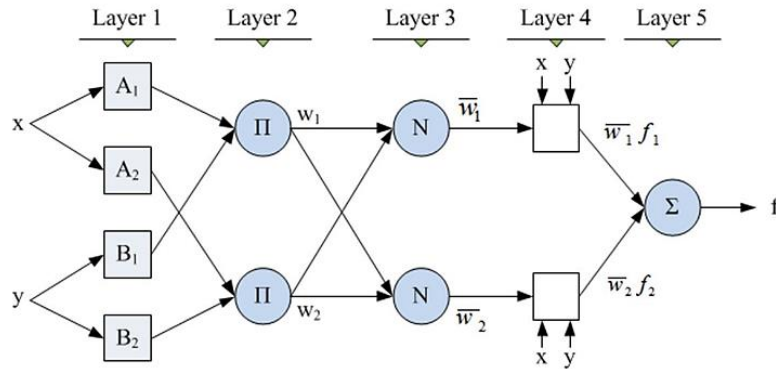


Figure 3. Adaptive network-based fuzzy inference system

2.4. Proposed Methodology

In this study, it is aimed to make a more successful positioning by using machine learning for a system that makes indoor positioning based on the RSSI information received from Bluetooth transmitters by fingerprint method. The model developed in this study consists of three parts. The first part is the preparation of the data set with the RSSI information of the Bluetooth transmitters using Fingerprint method, the second part is the development of machine learning models using ANFIS models and the third part is testing of the developed models and measuring their success. Proposed method is shown in Figure 4.

With the Fingerprint method, RSSI values from each transmitter (five transmitters) were recorded at (x-coordinate, y-coordinate) points of RSSI information received from Bluetooth transmitters in the study area. The fingerprinting method was chosen because it is a reliable method for indoor environments [33], does not require any license fee to read wireless signals traveling in the air, can be easily adjusted according to the desired situation, and can be used with a combination of other wireless technologies. The second part of the system aims to design an indoor positioning system using the ANFIS approach. The reasons for choosing the ANFIS method can be summarized as follows: It exhibits rapid convergence during the training phase, demonstrates a strong resistance to uncertainty, effectively extracts numerical models from numerical data, and allows for effortless expansion of the knowledge base through the incorporation of new rules.

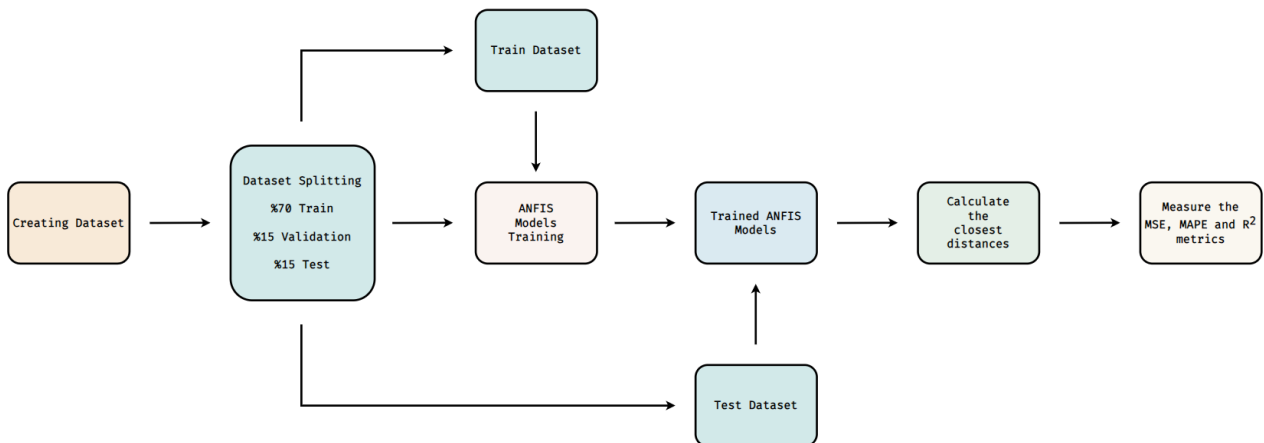


Figure 4. Proposed method

As shown in Figure 5, data was generated in the simulation environment with the "NAVINDOOR" [34] application to build and test the ANFIS model. Black lines represent the simulated existing walls. Red dots mark the locations

where measurements were taken in (x, y) coordinates. The placement of beacons (RSSI data signal emitters) at five different points is shown. By taking measurements on constantly changing routes, the distribution of the data set within the data set is diversified. Thus, it is predicted that the model to be developed will behave sensitively according to these changes. RSSI values of five beacons were generated from approximately 1050 locations and stored in the dataset. Table 1 shows sample RSSI values at some locations.

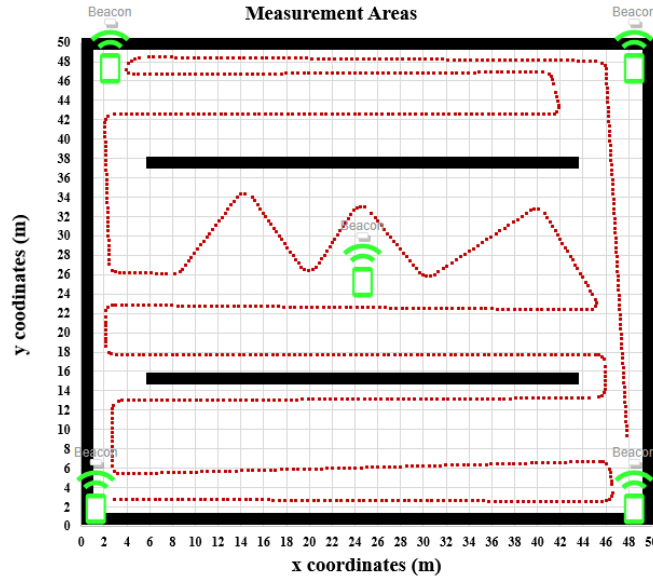


Figure 5. Divided working area

Table 1. An example of RSSI (dBm) data series taken from transmitters at the working area

Area (x coord., y coord.)	Beacon1	Beacon2	Beacon3	Beacon4	Beacon5
(9,2)	-73.3	-66.2	-64.8	-65.3	-68.5
(20,2)	-69.1	-68.5	-64.5	-65.2	-68.7
(39,2)	-66.7	-73.6	-65.5	-64.7	-67.5
(41,6)	-66.6	-73.0	-65.7	-64.9	-67.5
(23,6)	-68.1	-67.3	-65.5	-66.1	-68.8
(22,6)	-68.8	-68.0	-65.4	-65.4	-68.8

2.4.1. Development of the ANFIS Models

In this proposed work, an approach using the ANFIS model is tested by presenting not only RSSI values but also x and y coordinates values from which these values are obtained as input data Figure 3. Assume that at any time t, the receiver node at any (x, y) location receives RSSI values of the signals detected by the receiver node. At instant t at this point;

$$(x_1, y_1)t_1 = [RSSI1_{t_1} \text{ RSSI2}_{t_1} \text{ RSSI3}_{t_1} \dots \text{RSSI5}_{t_1}]$$

signals will be collected. The coordinates (x₁, y₁) serve as factors influencing the distance to the signal sources generating these signals in relation to both the x and y coordinates. As Equation 1 indicates, the RSSI value is directly linked to the distance, and any alterations in the (x, y) coordinate values, either horizontally or vertically, will result in variations in the signal values.

$$d = d_0 \times 10^{\left(\frac{P_0 - P_d}{10n}\right)} \Leftrightarrow P(d) = P_0 - 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \tag{1}$$

With this assumption, the coordinate values of the (x, y) point have an effect on the system as individual input parameters. An ANFIS model that predicts the node value (x₁, y₁) according to the RSSI signal values cannot simultaneously use the x or y coordinate values at this point as both input and output to the system. The solution is pursued by adopting an approach that involves creating two distinct models from the same dataset. A system is then developed to identify the node point, which is essentially the same but is generated differently based on the outputs of these two models. The effectiveness of ANFIS is evaluated within this framework.

In Table 2, two different models, named ANFIS Model 1 and ANFIS Model 2, were created using the same training data sets, the same parametric values and different input and output parameters.

Table 2. ANFIS models input-output parameters

Model's Name	Inputs	Outputs
ANFIS Model 1	x coordinate, RSSI1, RSSI2, RSSI3, RSSI4, RSSI5	y coordinate
ANFIS Model 2	y coordinate, RSSI1, RSSI2, RSSI3, RSSI4, RSSI5	x coordinate

A point in 2D space is composed of two different components, x and y, and the combination of these two values represents the position information. RSSI values vary with distance, and all (x, y) points in the area of interest are matched in the fingerprint database and hold point location information according to their RSSI values. Here, the main determinants of the object's distance to be located to the beacons (hence the measured RSSI value) are the individual x and y points and must be provided as input data to the system for training the models. This assumption clearly explains the reason for using two different models. The general operation of the system will be discussed through the steps of the setup and the architecture summarized in Figure 6.

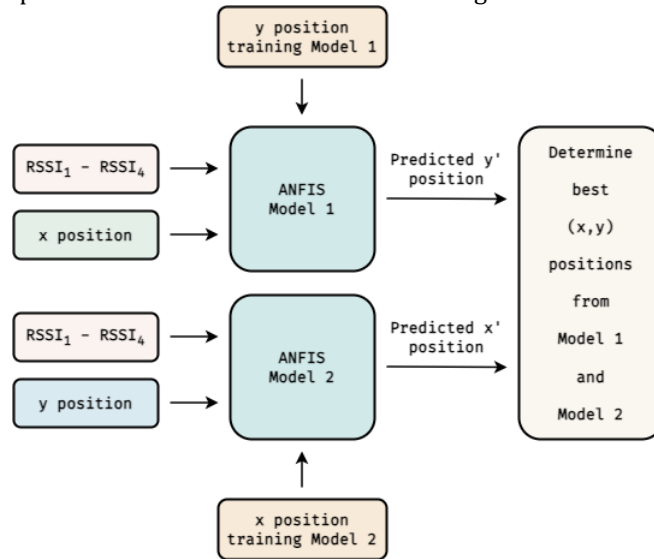


Figure 6. Schematic overview of the system

3. Results

3.1. Training and testing of the ANFIS_1

ANFIS_1 model is defined as the model in which the x value is presented as input with RSSI values (x_1 , RSSI1, ... RSSI5) and the possible y'_1 values will be calculated with reference to the y coordinate value. The input parameters of the model and the output parameters produced by the model are shown below.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} [RSS1 \dots RSS5] \rightarrow ANFIS_1 = \begin{bmatrix} y'_1 \\ y'_2 \\ y'_3 \end{bmatrix}$$

ANFIS models were trained using the data measured on the routes shown in Figure 7 and summarized in Table 1 (Training Dataset). However, the success of the trained model was demonstrated with test data generated on 3 different route scenarios in Figure 7. In these figures, the blue dots constitute the sample route scenario where RSSI values are detected. According to the x values of these points, the accuracy of the y' values generated by ANFIS_1 according to the y reference values were checked. Three test data sets at different points, which were not used in the training of the system, were generated by the data generation program. The results of these sets were evaluated in the trained ANFIS models, and the performance was confirmed.

To ensure that the ANFIS model accurately reflects the pattern structure of the dataset it's trained on, it is essential to determine the parameters and membership functions to reflect the effects on the model. For five inputs is shown in Table 2, the combinations of the membership functions used extensively in the literature were tested and

determined to produce the best model for the five inputs [35]. For each input {'pimf' 'gauss2mf' 'gauss2mf' 'gauss2mf' 'gauss2mf' 'gauss2mf'} membership functions were determined as a result of the experiments and used in training the models. During this phase, statistical metrics, including Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), and R-Squared (R2) [36], were employed to evaluate the results generated by the ANFIS models trained using various combinations of membership functions.

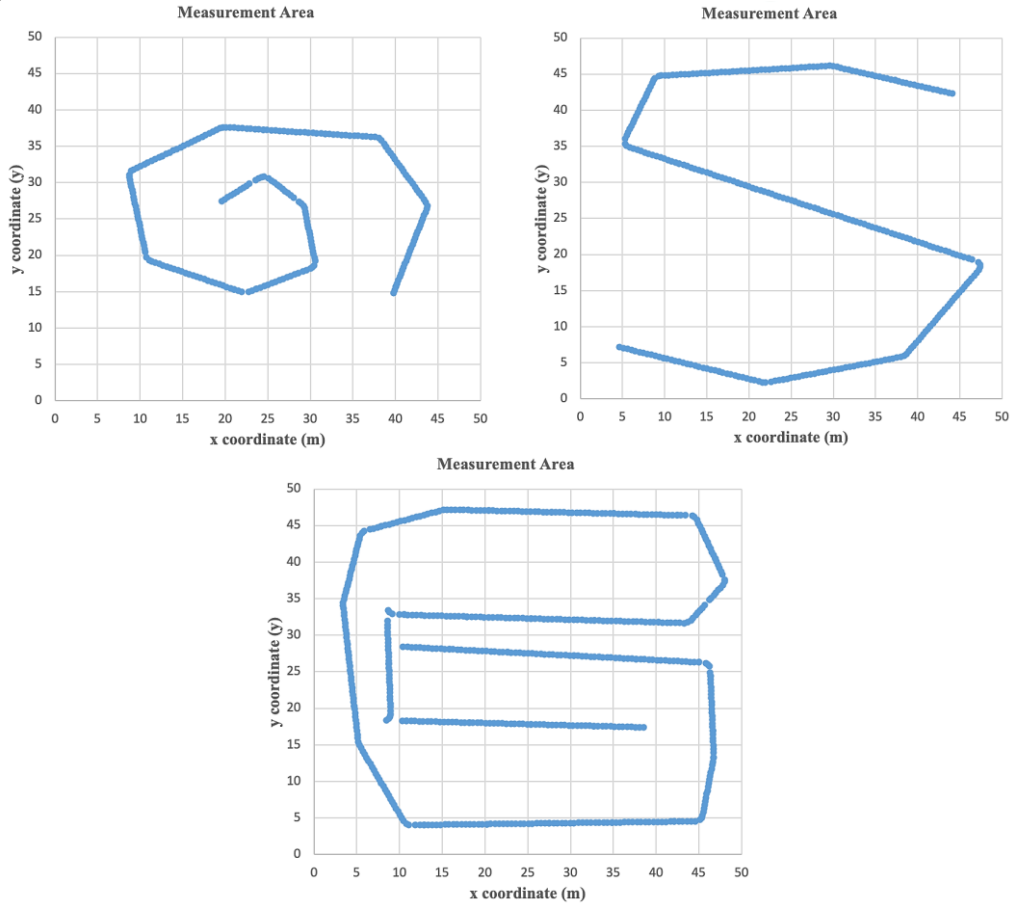


Figure 7. Test dataset 1, 2 and 3

To train and evaluate ANFIS models correctly, the data set is divided into three basic parts. These three parts are training data (80%), validation data (10%) and test data (10%). The training data is used for optimization of weight and parameter settings. The validation data is used to monitor the model's performance during training and to detect overfitting problems. Test data is used to evaluate how the model performs in the real world. These three separate datasets allow an ANFIS model to be trained and evaluated reliably and effectively. While these results obtained using the Datasets are subjected to analysis using statistical metrics, and the primary factor for determining the most effective ANFIS models is the outcomes on the Test Dataset, primarily relying on the R-Squared (R^2) value.

The values of all data sets used in ANFIS_1 model training are shown in Table 3. In addition, the statistical values produced according to the results of the test data sets created to test the success of ANFIS_1 model are presented in Table 3.

Table 3. Result values of ANFIS_1 model

Metrics	Dataset	Training	Validation	Test	Test 1	Test 2	Test 3
R^2	0.9879	0.9925	0.9711	0.9675	0.9567	0.7977	0.9294
RMSE	1.6760	1.3196	2.6074	2.7111	3.4095	3.7682	3.6791
MAPE	0.0941	0.0712	0.1452	0.2262	0.2651	0.1207	0.1395
MAE	1.1758	0.9773	1.8359	2.1015	2.3453	2.6171	2.2164

The variation of the actual locations (x, y) of the Test Datasets produced by the trained ANFIS_1 model and the (x, y') locations produced by ANFIS_1 model is shown in Figure 8.

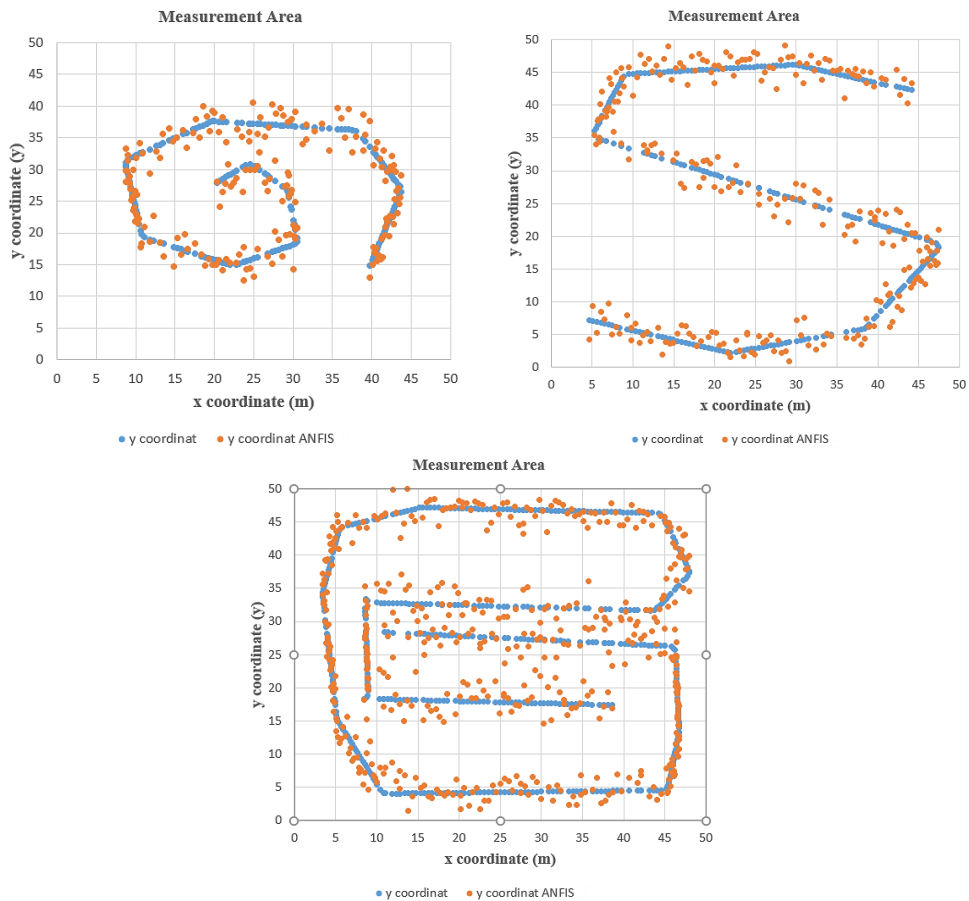


Figure 8. ANFIS_1 test dataset 1, 2 and 3 results

The error plots between the actual y coordinate values and the y' coordinate value generated by the ANFIS_1 model with x coordinate and RSSI values are shown in Figure 9 in descending order.

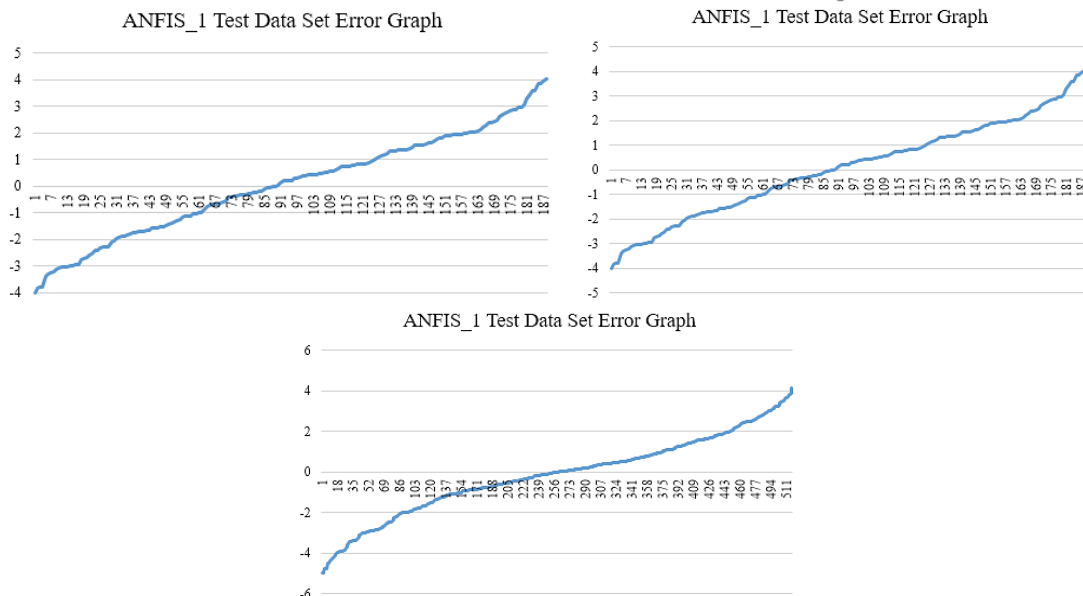


Figure 9. ANFIS_1 test dataset error graph

3.2. Training and testing of the ANFIS_2

In the same way as the ANFIS_1 model, ANFIS_2 model is defined as the model in which the coordinate data y is presented as input with RSSI values ($y_1, RSS1...RSS5$), and the possible x'_1 values will be calculated with reference to the x coordinate value. The following figure shows the input parameters of the model and the output parameters produced by the model.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} [RSS1 \dots RSS5] \rightarrow ANFIS_2 = \begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{bmatrix}$$

The values of all data sets used in ANFIS_2 model training are shown in Table 4. In addition, the statistical values produced according to the results of the test data sets created to test the success of the ANFIS_2 model are presented in Table 4.

Table 4. Result values of ANFIS_2 model

Metrics	Dataset	Training	Validation	Test	Test 1	Test 2	Test 3
R ²	0.9811	0.9912	0.9486	0.9398	0.9627	0.7772	0.9585
RMSE	1.9673	1.3277	3.4314	3.5784	2.5537	5.7589	3.0462
MAPE	0.1194	0.0677	0.4049	0.2474	0.5883	0.2287	0.2224
MAE	1.2825	1.0052	2.3818	2.3990	1.8217	3.3821	1.9636

The variation of the actual locations (x, y) of the Test Datasets generated by the trained ANFIS_2 model and the (x, y') locations generated by ANFIS_2 model is shown in Figure 10.

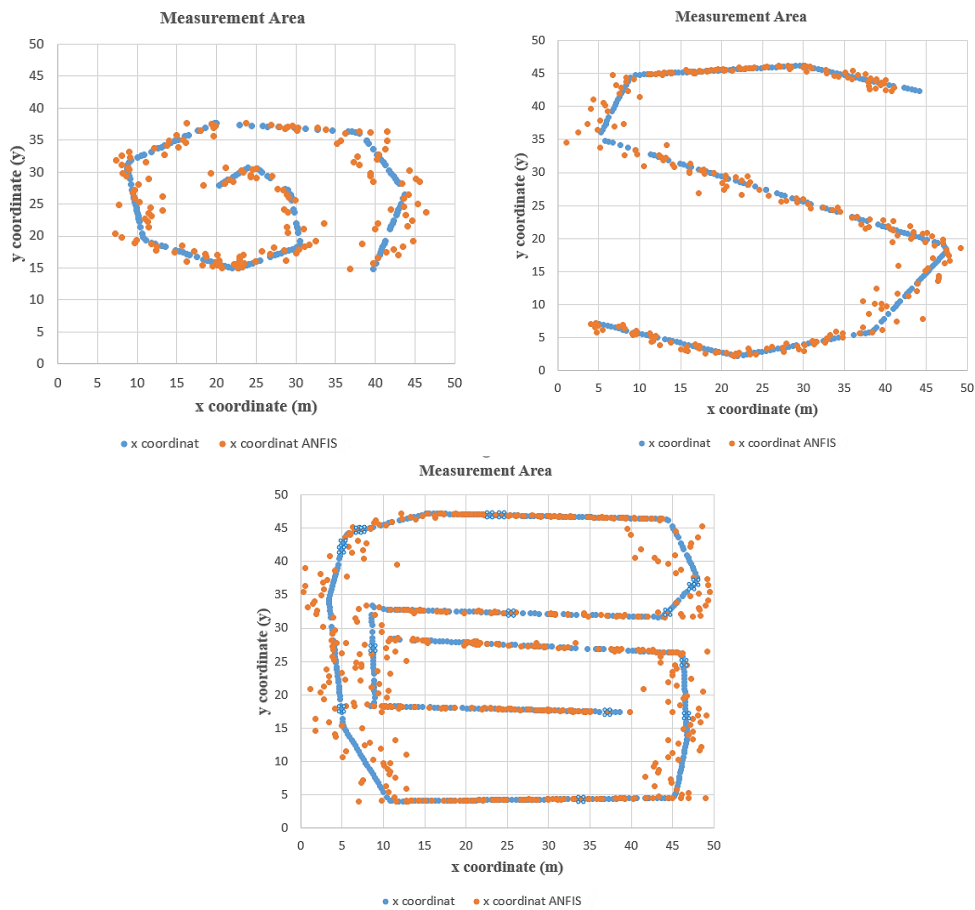


Figure 10. ANFIS_2 test dataset 1, 2 and 3 results

The error plots between the actual y coordinate values and the y' coordinate value generated by the ANFIS_2 model with x coordinate and RSSI values are shown in Figure 11 in descending order.

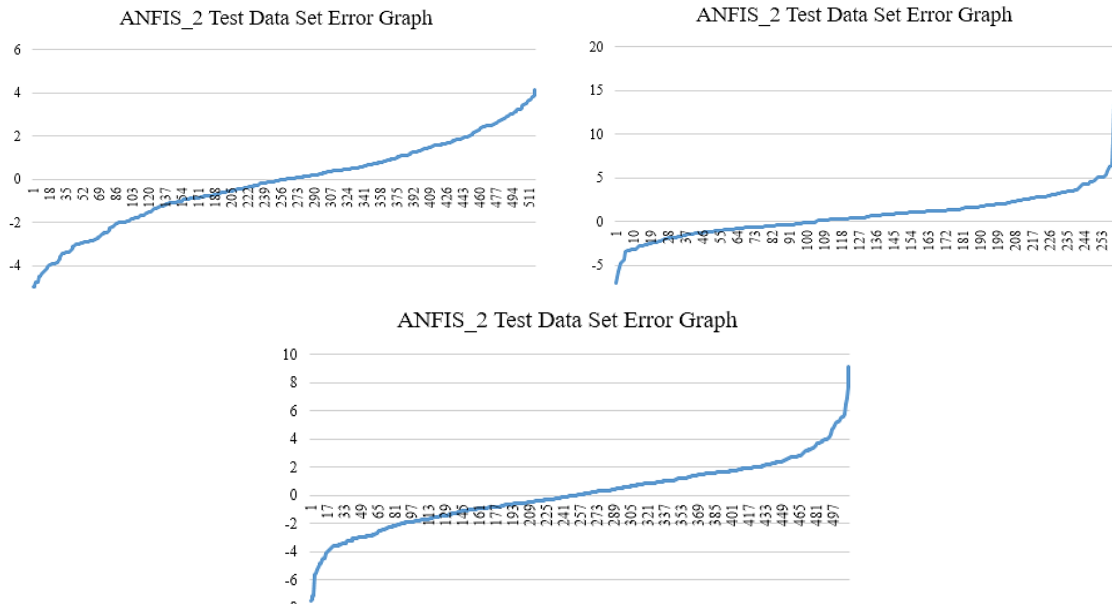


Figure 11. ANFIS_2 test dataset error graph

3.3. Position detection model

ANFIS_1 and ANFIS_2 are developed with the logic that x and y coordinates are separate inputs and outputs. The object at any (x, y) point detects the values between RSSI1-RSSI5, and the main idea of this study is to find the unknown x,y values from these data with minimum deviation. The flow of the computational steps of the proposed new model is shown step by step in Table 5. In summary, the dataset used to train the ANFIS model is acquired through a hardware setup in the workspace and stored in a database table. This dataset is then partitioned into training, testing, and validation subsets. Following the allocation of values to these subsets, the models are trained using the training data. The post-training ANFIS models consist of two separate models, both employing the same dataset and parameters but different inputs. The first model is designed to generate y'-coordinate information as output for each x-coordinate data, using the RSSI information from the training dataset and the corresponding x-coordinate information as input. The second model is configured to take the nine RSSIs from the training dataset and the associated y-coordinate data as input, producing x'-coordinate information as output for each y-coordinate data. The goal is to find a point that corresponds to the [(x, y')] matrix produced by the first model and the [(x', y)] matrices produced by the second model, aiming to locate the same point.

Table 5. Proposed System Process Steps
Proposed System

- ANFIS_1 Input → [x , RSSI1-5], Output → [y]
- ANFIS_2 Input → [y , RSSI1-5], Output → [x]
- The environment (represented by "T") where position sensing is to be performed is divided into grids with x and y coordinates at 0.5-meter intervals.
 $x \rightarrow [0.5, 1, 1.5, 2, \dots 50]$
 $y \rightarrow [0.5, 1, 1.5, 2, \dots 50]$
- The sample object to be located (represented by "O") is at an unknown point (x, y) in the environment T.
- The RSSI=[RSSI1, RSSI2, RSSI3, RSSI4, RSSI5] values received by O at this point are read.
- ANFIS_1 Model: Calculates [y'] values for each x grid value within the [RSSI] vector and the [x] vector.
 - [x] ANFIS_1 [RSSI] → generates the vector [y'].
- ANFIS_2 Model: Calculates [x'] values for each y grid value within the [RSSI] vector and the [y] vector.
 - [y] ANFIS_1 [RSSI] → generates the vector [x'].
- Two different possible location maps are created, represented by [(x, y')] and [(x', y)] matrices, trained with different input and output parameters. Here, the study is finalized by searching for the points where the [RSSI] vectors form a similar pattern in both matrices and determining the point that is closest to each other as the location point of O.

3.4. Testing the system developed for positioning

The test of the success of the proposed system can be examined by following the steps summarized in Table 5 on a sample point taken from the Test Datasets. The model is tested by selecting the measurement data of any point produced in "Test Dataset 1", shown in Table 6.

Table 6. Proposed System Process Steps

x	y	RSSI Values			
42	17	-65.8	70.3	-67.7	-65.7 -69.1

As shown in Figure 12, RSSI values and x were presented to the model one by one by increasing x by 0.5 m intervals, and y' values were calculated. With the same approach, as shown in Figure 12, RSSI values and y were incremented by 0.5 m intervals and presented to the model one by one, and x' values were calculated. When the representative positioning graphs of all values produced by the ANFIS models are examined, it is seen that some values are out of interest or even unacceptable values. As shown in Figure 13, when the outputs produced by the two ANFIS models are combined in a graph, it is easily understood that the unknown (x, y) position values of the searched object are actually the same point calculated separately by both models.

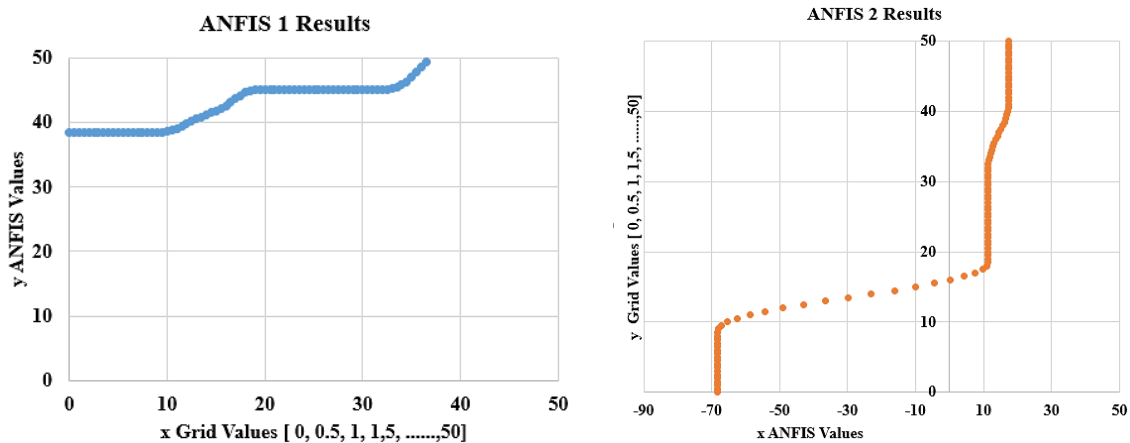


Figure 12. ANFIS_1 and ANFIS_2 model results

As shown in Figure 13, the desired set of location values consists of coordinate values where the results generated by ANFIS_1 (blue circles) and ANFIS_2 (orange circles) intersect or are in close proximity. To pinpoint the precise point, the distances between the points produced by the two models are computed, and only points that are within a specific tolerance are further examined, while those outside this tolerance are excluded from the analysis. In this process, the emphasis is placed on the Region of Interest (ROI) area, where the points calculated differently by the two models are in close proximity to each other.

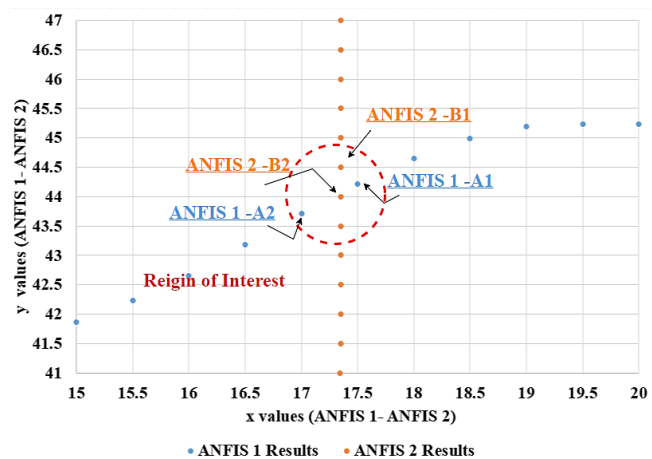


Figure 13. ANFIS models results (together)

The distances of the points (x, y') and (x', y) are calculated by the equation given below, similar to the Euclidean formula.

$$d(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2} \tag{2}$$

As shown in Figure 12, close points are identified as ROIs, and examinations are continued on the calculated values. As can be understood, the number of points, initially 50x50, is reduced to 4 points in this example.

As shown in Figure 12, A1 and A2 correspond to points generated by ANFIS_1, while B1 and B2 represent points generated by ANFIS_2. It is assumed that the point pairs in groups A and B actually correspond to the same location, as intended during model creation. Consequently, we aim to identify which pairs represent the same points by assessing the proximity between A1 and B1 or A2 and B2. If we reduce the tolerance value applied for the test to 4 points, the number of points in various scenarios may increase. Hence, the same relationship, as described earlier, should be extended to include these points. Table 7 provides a summary of this process. The primary goal of this procedure is to determine the desired location information, which is calculated by Model 1 and Model 2 using different parameters but represents the coordinates of the same point within the measurement area. The proximity of the points plays a crucial role, effectively employing a small clustering method.

Table 7. Algorithm of Choosing the Best Point

Choosing Best Point	
• Calculate distances between points calculated by ANFIS_1 and ANFIS_2 models (pairs A and B)	
○ A1 → (x _{A1} , y _{A1}) A2 → (x _{A2} , y _{A2})	
○ B1 → (x _{B1} , y _{B1}) B2 → (x _{B2} , y _{B2})	
○ A1 → B1 and A2 → B2	
• Identify the smallest distance between these pairs of points	
○ Distance between A1 and B1 → d1	
○ Distance between A2 and B2 → d2	
• Combine coordinates in short-distance pairs	
○ If d1 < d2, the searched position = (x _{A1} , y _{B1})	
○ If d2 < d1, the searched position = (x _{A2} , y _{B2})	

Table 8 shows the implementation of the algorithm summarized in Table 7 on the sample test data.

Table 8. Developed Model Point Calculation Values

Model Point Calculation Values			
Coordinates of Reducing Points		y coord.	x coord.
	A1	17.5	42.81
	A2	17	43.71
	B1	17.31	43
	B2	17.34	44.5
Distances Between Points	A1 → B1	A1 → B2	
	0.34	0.86	
Sought Point	x coord.	y coord.	
	42.81	17.31	
Test Point	x coord.	y coord.	
	42	17	

To examine the results of the model's success, the data calculating the distances (errors) between the point values produced by the model for 2 different points selected from each test set are listed in Table 9.

Table 9. Outputs of Test Data

	Item No	x Coordinate Test	y Coordinate Test	x Coordinate ANFIS Model	y Coordinate ANFIS Model
Test 1	1	27	29	27.74	26.94
Test 2	2	34	24	33.45	25.13
Test 3	3	4	20	3.3422	19.45
Test 1	4	30	21	31.03	21.73
Test 2	5	31	4	31.65	4.873
Test 3	6	14	18	13.237	16.93

A visual comparison of the test data generated by the ANFIS system, which has never been presented to this system before, is shown in Figure 14.

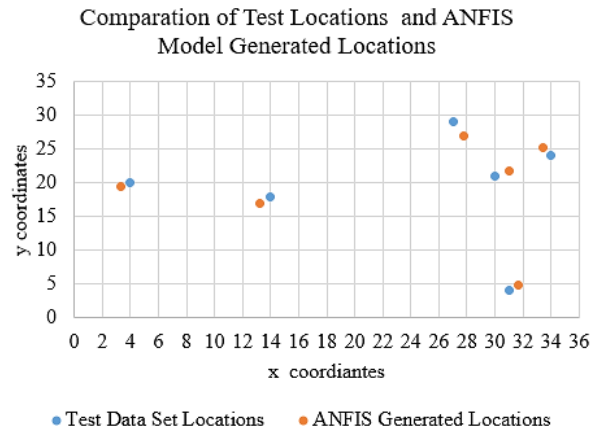


Figure 14. Visual comparison of test data and ANFIS data

4. Discussion and Conclusion

The importance of indoor positioning technologies and methods is constantly increasing due to the high number of applications developed on the concept and its wide range of applications. Moreover, the increasing prevalence of the Internet of Things (IoT) serves as another factor that elevates the significance of indoor positioning. In this context, achieving the most precise and consistent indoor positioning is a pivotal stride toward establishing an efficient indoor positioning system. Extensive research has been conducted at both academic and industry levels to attain this objective. Differing from its counterparts in the existing literature, this study endeavors to design an indoor positioning system utilizing the ANFIS model, aiming to enhance its performance. While "RSSI-based technologies offer advantages such as simplicity of use, easy installation, no requirement for specialized equipment, cost-effectiveness, high energy efficiency, and seamless integration into numerous ecosystems, the "Fingerprint" method presents advantages in terms of being cost-free, flexible, and compatible with a wide range of devices and environments. An enhanced model is introduced, rooted in the ANFIS theory, which is one of the machine learning methodologies.

To determine the unknown locations of the objects in the ROI area, RSSI values and possible location (x, y) values are presented to the system separately for ANFIS training. With two different ANFIS models, the location information was generated by determining the closest ones to the solution from the x' and y' location information produced by these inputs.

The dataset shown in Figure 5 was created not by measuring the entire indoor environment where the measurements were made very precisely but by measuring more superficial and intermittent measurements. The aim here is to demonstrate the success of the proposed model in such an environment by using a dataset that does not represent the environment very well. As shown in Table 7 and Figure 14, the model produced good performance despite this disadvantage of the data set. With this study, a different approach has been used that will shed light on similar studies in the literature, and an acceptable improvement has been achieved.

The results obtained in this study also provide information about the design and installation of the system in an indoor environment. To achieve a satisfactory success rate, parameters such as the number and placement of access points in the system, the number of data, and the data collection method should be well determined. In future studies, the system's success can be increased by determining these parameters more optimally. A machine learning approach can be used for better placement of access points and a better balance between cost and accuracy. Considering the importance of correctly training machine learning models for the system's success, the system can be trained with more training data.

References

- [1] Vanneschi L., Silva S. 2023. Lectures on Intelligent Systems. 1st edition. Springer Nature. Switzerland, 349s.
- [2] Xiao Q. 2023. A review: Wireless sensor network location. *Journal of Physics*, 2580(1), 1-7.
- [3] Brena RF, García-Vázquez JP, Galván-Tejada CE, Muñoz-Rodríguez D, Vargas-Rosales C, Fangmeyer J. 2017. Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey. *Journal of Sensors*, 2017(1), 1-21.
- [4] Frattasi S, Rosa FD. 2017. *Mobile Positioning and Tracking: From Conventional to Cooperative Techniques*. 2nd edition, John Wiley & Sons. New York, USA, 416s.
- [5] Zandian R. 2019. *Ultra-wideband Based Indoor Localization of Mobile Nodes in ToA and TDoA Configurations*. Universität Bielefeld, PhD Thesis, 255s, Biefeld.

- [6] Dziubany M, Machhamer R, Laux H, Schmeink A, Gollmer KU, Burger G, Dartmann G. 2018. Machine Learning Based Indoor Localization Using a Representative k-Nearest-Neighbor Classifier on a Low-Cost IoT-Hardware. 26th European Signal Processing Conference, Rome, Italy.
- [7] Bai YB. 2016. Development of a WiFi and RFID based indoor location and mobility tracking system. Royal Melbourne Institute of Technology, PhD Thesis, 233s, Melbourne Australia.
- [8] Gao X. 2018. UWB Indoor Localization System. The George Washington University, Master Thesis, 178s, Ann Arbor USA.
- [9] Liu H, Darabi H, Banarjee P, Liu J. 2007. Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 37(6), 1067-1080.
- [10] Gu Y, Lo A, Niemegeers I. 2009. A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 11(1), 13-32.
- [11] Deak G, Curran K, Condell J. 2012. Review: A survey of active and passive indoor localisation systems. Computer Communications, 35(16), 1939-1954.
- [12] Han Z. 2016. Robust and accurate localization algorithms for indoor positioning and navigation. Nanyang Technological University, PhD Thesis, 216s, Singapore.
- [13] Sumitra ID, Supatmi S, Hou R. 2018. Enhancement of Indoor Localization Algorithms in Wireless Sensor Networks: A Survey. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 9 May, Bandung, Indonesia.
- [14] Doiphode SR, Bakal JW, Gedam M. 2016. Survey of Indoor Positioning Measurements, Methods and Techniques. Internal Journal of Computer Applications, 140(7), 1-4.
- [15] Liu J. 2014. Survey of wireless based indoor localization technologies. Department of Science & Engineering, Washington University, 2014.
- [16] Al-Ammar MA, Alhadhrami S, Al-Salman A, Alarifi A, Al-Khalifa HS, Alnafessah A, Alsaleh M. 2014. Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms. 2014 International Conference on Cyberworlds, Santander, Spain.
- [17] Al Nuaimi K, Kamel H. 2011. A survey of indoor positioning systems and algorithms. 2011 International Conference on Innovations in Information Technology, Abu Dhabi, United Arab Emirates.
- [18] Oguntala G, Abd-Alhameed R, Jones S, Noras J, Patwary M, Rodriguez J. 2018. Indoor location identification technologies for real-time IoT-based applications: An inclusive survey. Computer Science Review, 30(2018), 55-79.
- [19] Malavalli R, Earthperson A, Gupta. 2017. Indoor Localization Through Machine Learning on WiFi Fingerprints. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sapporo, Japan.
- [20] Mascharka D, Manley E. 2016. Machine Learning for Indoor Localization Using Mobile Phone-Based Sensors. 2016 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference, Las Vegas, USA.
- [21] Salamah AH, Tamazin M, Sharkas MA, Khedr M. 2016. An enhanced WiFi indoor localization system based on machine learning. 2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Alcalá de Henares, Spain.
- [22] Hsieh JY, Fan CH, Liao JZ, Hsu JY, Chen H. Study on the application of indoor positioning based on low power Bluetooth device combined with Kalman Filter and machine learning. EasyChair PrePrint, 2516-2524.
- [23] AlHajri MI, Ali NT, Shubair RM. 2019. Indoor Localization for IoT Using Adaptive Feature Selection: A Cascaded Machine Learning Approach. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 18(11), 2306-2310.
- [24] Terán M, Carrillo H, Parra C. 2018. WLAN-BLE Based Indoor Positioning System using Machine Learning Cloud Services. 2018 IEEE 2nd Colombian Conference on Robotics and Automation, Barranquilla, Colombia.
- [25] Chuenurajit T, Phimmasean S, Cherntanomwong P. 2013. Robustness of 3D indoor localization based on fingerprint technique in wireless sensor networks. 2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Krabi, Thailand.
- [26] Jang JSR. 1993. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 23(3), 665-685.
- [27] Jang JSR. 1991. Fuzzy modeling using generalized neural networks and kalman filter algorithm. Association for the Advancement of Artificial Intelligence, 91(1991), 762-767.
- [28] Tsoukalas LH, Uhrig RE. 1996. Fuzzy and neural approaches in engineering. 1st edition. John Wiley & Sons. New York, USA, 600s.
- [29] Buragohain M. 2009. Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) as a tool for system identification with special emphasis on training data minimization. Indian Institute of Technology Guwahati, PhD Thesis, 110s, Guwahati, India.
- [30] Franklin GF, Powell JD, Workman ML. 1997. Digital control of dynamic systems. 3rd edition. Addison-Wesley. New York, USA, 794s.
- [31] Özgan E, Kap T, Beycioğlu A, Emiroğlu M. 2009. Asfalt Betonunda Marshall Stabilitésinin Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Mantık Yaklaşımı ile Tahmini. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, Turkey.
- [32] Güney K, Sarıkaya N. 2008. Dairesel Mikroserit Antenlerin Yama Yarıçapının Çeşitli Algoritmalarla Optimize Edilen Bulanık Mantık Sistemine Dayalı Uyarlanır Ağlar İle Hesaplanması. Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, Turkey.

- [33] Laitinen E, Lohan, ES. 2016. On the Choice of Access Point Selection Criterion and Other Position Estimation Characteristics for WLAN-Based Indoor Positioning. *Sensors*, 16(5), 737.
- [34] Navindoor. "A simulation tool for the design, testing and evaluation of localization algorithms". <https://deustotech.github.io/navindoor-documentation/>
- [35] MATLAB. Genfis Options. <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/genfisooptions.html>
- [36] González-Sopeña JM, Pakrashi V, Ghosh B, 2021. An overview of performance evaluation metrics for short-term statistical wind power forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110515.

Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü Değişim Analizi ve Geleceğe Yönelik Simülasyon Modeli, Kayseri Melikgazi Örneği

Kübra Nur GÖNCÜLER¹, Ümran KÖYLÜ^{*1}

*1 Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 31.01.2024, Kabul / Accepted: 29.04.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

Anahtar Kelimeler

Arazi Kullanımı,
Arazi Örtüsü,
Uzaktan Algılama,
Coğrafi Bilgi Sistemleri,
Hücreli Otomat,
Yapay Sinir Ağları

Öz: Arazi kullanımı ve arazi örtüsü yapısı hızla artan nüfus, değişen teknoloji, ekonomik etkiler sebebiyle değişime uğramaktadır. Bu değişimleri incelemek, daha planlı alanlar oluşturma isteği ve gelecekte nasıl bir noktaya gelineceği merakı değişim analizi ve geleceğe yönelik model oluşturma tekniklerini kullanma çalışmaları yapmaya teşvik etmektedir. Bu çalışma 2000-2020 yılları arasında Melikgazi ilçesindeki arazi örtüsü ve arazi kullanım değişimleri coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Landsat ETM ve Landsat 8 uydu görüntüleri kullanılarak kontrollü sınıflandırma yöntemlerinden biri olan Maksimum Olabilirlik Yöntemi kullanılarak arazi kullanım haritaları oluşturulmuş ve bu haritalar incelenerek değişim analizleri yapılmıştır. 2000 yılından 2020 yılına gelene kadar özellikle yerleşim alanlarında %143'lük bir büyüme görülmüştür. En çok değişimin yerleşim alanlarında yaşandığı tespit edilmiştir. Bu aşamadan sonra 2030 ve 2040 yılları için simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Simülasyon modelini oluşturmak için Yapay Sinir Ağları ve Hücreli Otomat yöntemlerinin entegre şekilde kullanıldığı bir modelleme yöntemi tercih edilmiştir. Gelecekte de yerleşim alanlarında artışın devam edeceği gözlemlenmiştir.

Land Use and Land Cover Change Analysis and Future Simulation Model, Kayseri Melikgazi Case

Keywords

Land Use,
Land Cover,
Remote Sensing,
GIS,
Cellular Automata,
Artificial Neural Networks

Abstract: Land use and land cover structure are changing due to rapidly increasing population, changing technology and economic impacts. The desire to examine these changes, the desire to create more planned areas and the curiosity of how to reach a point in the future encourage studies to use change analysis and future modeling techniques. In this study, land cover and land use changes in Melikgazi district between 2000-2020 were analysed using geographic information systems and remote sensing methods. Using Landsat ETM and Landsat 8 satellite images, land use maps were created using the Maximum Likelihood Method, one of the controlled classification methods, and these maps were examined and change analyses were made. From 2000 to 2020, a 143% growth was observed, especially in residential areas. It was determined that the most change was experienced in residential areas. After this stage, simulation models were created for the years 2030 and 2040. In order to create the simulation model, a modelling method in which Artificial Neural Networks and Cellular Automata methods are used in an integrated manner was preferred. It has been observed that the increase in settlement areas will continue in the future.

*İlgili Yazar e-mail: umrank@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Arazi örtüsü ve arazi kullanımındaki değişimler her ne kadar doğal olaylarla gelişen bir süreç olarak bilinse de insanların ihtiyaçlarından ve yaşam biçimlerinden de önemli oranda etkilenmektedir. Arazi kullanımı ve arazi örtüsündeki bu değişimler ekosistemler ve biyoçeşitlilik, insan sağlığı, gıda güvenliği, iklim değişikliği, toprak ve suyun bozulmasında önemli bir etkisi vardır [1]. Artan nüfusla beraber yerleşim alanı ihtiyacının doğması tarım, orman ve yeşil alan gibi ekosisteme katkı sağlayan bölgelerin tahribatına sebep olmaktadır.

Birleşmiş Milletler (BM) verilerine göre 1950'de nüfusun üçte biri kentlerde yaşarken 2050 yılında bu oranın üçte ikiye yükselmesi bekleniyor [2]. Bugün ise Dünya nüfusunun yarısı şehirlerde yaşamaktadır. Kentlerde artan nüfusla birlikte arazi kullanım yapısında da değişimler yaşanmaya başlanmıştır. Bu değişimler ise sürdürülebilir kalkınma, sürdürülebilir şehirler kurma hedeflerini tehdit etmektedir.

Hızlı nüfus artışıyla beraber gelen, insanların daha iyi koşullarda yaşama isteği, sanayi alanlarının artmasıyla birlikte iş imkanlarının çoğalması, daha iyi eğitim alabilmek gibi nedenler kent alanlarında yaşamı popüler hale getirmiştir. Artan kentsel nüfus özellikle şehir merkezlerinin büyüyüp, genişlemesine ve tarım alanı, orman alanları, yeşil alanlar gibi arazi kullanım alanlarının işgal edilmesine sebep olmaktadır.

Artan nüfusla birlikte arazi kullanımında yaşanan değişimlerin etkisi sebebiyle, araştırmacılar tarafından izleme, değerlendirme, haritalama ve geleceğe dönük modeller oluşturma konusunda çalışmalar yapılmaktadır [3]. Uzaktan algılama yardımıyla elde edilen uydu görüntülerini, coğrafi bilgi sistemlerinin analiz etme ve yorumlama gücüyle birleştirilerek arazi örtüsü ve arazi kullanımındaki değişimleri inceleme konusunda kolay ve güvenilir bir yol olarak tercih edilmektedir [3,4]. Uzaktan algılama sistemleriyle sağlanan uydu görüntüleri arazi örtüsü ve arazi kullanımı verileri oluşturmakta ve anlamlı bilgilere ulaşılmasını sağlamaktadır. Coğrafi bilgi sistemleri ise bu verilerin depolanması, analiz edilmesi, yorumlanması ve planlama yapma aşamasında kullanılmaktadır.

Arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişiminin incelenmesi ve geleceğe yönelik simülasyon modellerinin oluşturulması alanında literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır. Tawfeeq ve Kurban [4] 2002-2018 yılları arasındaki arazi kullanım/arazi örtüsü değişikliklerini incelemişlerdir. Çalışmada sınıflandırma yöntemi olarak Maksimum Olabilirlik Yöntemi kullanılmıştır. Sınıflandırılmış verileri ile Terrset yazılımında bulunan Land Change Modeler (LCM) aracı kullanılarak 2030 ve 2035 yıllarına ait simülasyon verileri üretilmiştir. Hücresel otomat ve Markov Zincirleri yöntemini entegre şekilde kullanmışlardır. Bolat ve Doğan [15] kontrolsüz sınıflandırma yöntemlerini kullanarak Gölcük ilçesine ait 1984-2020 yıllarına ait uydu görüntülerini sınıflandırmışlardır. Bu yıllar arasındaki arazi kullanım/arazi örtüsü değişimlerini incelemişlerdir. QGIS içerisinde bulunan MOLUSCE eklentisini kullanarak 2035 yılına ait simülasyon modeli oluşturmuşlardır. Simülasyon yöntemi olarak Yapay Sinir Ağı modelini kullanmışlardır. Modellemenin oluşturulması için sınıflandırılan görüntüler dışında yükseklik, eğim, bakı, akarsuya uzaklık ve karayoluna uzaklık verilerini kullanmışlardır. Karip ve Göksel [16] İğneada koruma alanının arazi kullanım ve arazi örtüsü değişimlerini incelemiş ve 2030 yılı için tahmin simülasyonu oluşturmuşlardır. Arazi kullanım ve arazi örtüsü haritaları oluştururken kontrollü sınıflandırma yöntemini kullanmışlardır. Markov Zincirlerine dayalı Stokastik Markov modeli, Hücresel Otomat Markov modeli ve Çok Tabanlı Algılayıcı Yapay Sinir Ağıyla çalışan Markov modeli yöntemlerini kullanarak 2030 yılı için simülasyon modelleri oluşturmuşlardır. Kafy ve arkadaşları [17] Bangladeş'te 2012-2018 yılları arasındaki arazi kullanım ve arazi örtüsü haritalarını Destek Vektör Makinesi sınıflandırma yöntemini kullanarak oluşturmuşlardır. Elde ettikleri arazi kullanım haritaları ve yollara uzaklık, suya uzaklık, yerleşim alanı, eğim gibi bağımsız verileri de kullanarak 2025 yılı için simülasyon modeli oluşturmuşlardır. Simülasyon modeli için QGIS yazılımı içerisinde bulunan MOLUSCE kullanılmış ve Yapay Sinir Ağları Hücresel Otomat algoritmasını kullanarak tahmin modellerini oluşturmuşlardır. Canpolat ve Dağlı [18] Elazığ ilinin arazi kullanım ve arazi örtüsü değişimlerini inceleyip geleceğe dönük simülasyon modeli oluşturmuşlardır. Simülasyon çalışması için Terrset ve Geosos-Flus yazılımlarını kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda bitki örtüsü, mera ve su alanlarının azalacağını, orman, çalı ve yerleşim alanlarının artacağını tespit etmişlerdir. Aydın [19] Ankara ili için Hücresel Otomat tabanlı bir simülasyon yaklaşımı kullanmıştır. Çalışmasında 1942-2020 yılları arasındaki değişimleri incelemiş elde ettiği analiz verilerinden yola çıkarak 2032 yılında Ankara ilinin arazi kullanımında ne gibi değişimler yaşanacağıyla ilgili simülasyon modeli oluşturmuştur. Blissag, Yebdri ve Kassar [21] Hodna havzasının 2000 ve 2020 yılları arasındaki arazi kullanım değişimlerini incelemiş ve 2050 yılı için bir simülasyon modeli oluşturmuşlardır. Çalışmaların her 5 yıllık periyot için arazi kullanım haritaları oluşturmuşlardır, arazi kullanım haritalarını sınıflandırırken Maksimum Olabilirlik Yönteminden faydalanmışlardır. 2050 yılı için oluşturdukları simülasyon haritası için QGIS yazılımı içerisinde bulunan MOLUSCE eklentisini kullanmışlardır. YSA-HO algoritmalarını kullandıkları çalışmalarında girdi verisi olarak yükseklik, eğim, bakı, akarsuya uzaklık, yollara uzaklık ve yerleşim alanına uzaklık verilerini kullanmışlardır.

Bu çalışmada Kayseri ili Melikgazi ilçesinin 2000-2020 yılları arasındaki arazi örtüsü ve arazi kullanımı değişimlerini tespit etmek için uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri yöntemlerinden yararlanılmıştır. Ayrıca 2030 ve 2040 yıllarına ait tahmin modelleri oluşturabilmek ve gelecekte ne gibi değişimler olacağını gözlemleyebilmek için Yapay Sinir Ağları ve Hücresel Otomat yöntemleri entegre bir şekilde kullanılarak tahmin modelleri oluşturulmuştur. Daha önce Kayseri özelinde yapılmış çalışmalar bulunmaktadır fakat bunlar çoğunlukla Kayseri merkez üzerinde yapılmış çalışmalardır. Araştırmalar sonucunda Melikgazi ilçesi özelinde yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma Kayseri'nin nüfus olarak en kalabalık olan ilçesi Melikgazi için hem literatüre hem de ilçenin yerel yönetimine büyük katkı sunmayı amaçlamaktadır.

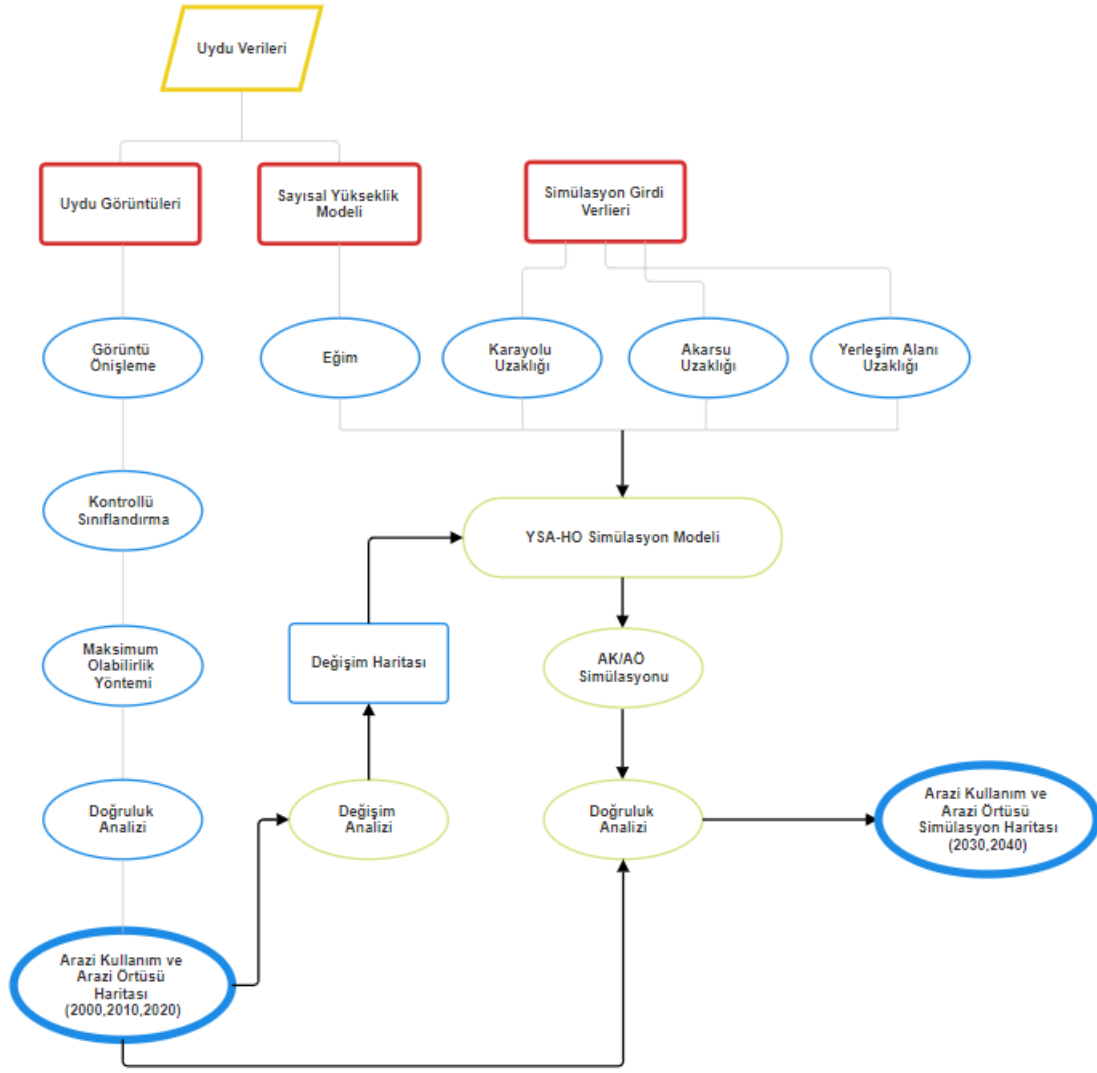
Bu makale Melikgazi ilçesinin arazi kullanım ve arazi örtüsü değişimlerinin incelenmesi ve geleceğe yönelik simülasyon modeli oluşturulması aşamalarını içermektedir. Makalenin 2.bölümünde kullanılan veriler ve yöntemler açıklanmış ve 5 ana başlığa ayrılarak konular detaylandırılmıştır. 3.bölümde çalışma sonucunda elde edilen bulgular açıklanmış ve çalışma üzerine tartışılmıştır. 4. bölüm sonuçtur ve makalenin son bölümüdür.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada görüntü ön işlemleri ve görüntü sınıflandırma işlemi için ENVI 5.3 yazılımı, değişiklik tespit süreçleri ve simülasyon girdi verilerinin oluşturulması için ArcGIS 10.4 yazılımı ve gelecekteki arazi kullanım tahmin modelinin oluşturulması için QGIS 2.18 yazılımı içerisindeki MOLUSCE eklentisi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan görüntüler USGS Earth Explorer tarafından sağlanan uydu görüntüleridir.

Çalışmada 2000, 2010 ve 2020 yıllarına ait uydu görüntüleri kullanılmıştır. Arazi örtüsü ve arazi kullanım haritalarının oluşturulabilmesi için Landsat uydu sistemine ait olan Landsat ETM (16 Ağustos 2000 ve 20 Ağustos 2010) ve Landsat 8 (15 Ağustos 2020) uydu görüntüleri kullanılmıştır. Özellikle çalışılan 3 yıl için Ağustos ayının tercih edilmesinin nedeni görüntülerdeki bulutluluk oranının az olmasından kaynaklanmaktadır. Çalışma alanı için elde edilen her bir uydu görüntüsü ayrı bantlar halinde elde edilmiştir ve her yıl için bant birleştirme işlemi uygulanmıştır. Bant birleştirme işlemi ENVI 5.3 yazılımı içerisinde bulunan Layer Stack aracı ile gerçekleştirilmiştir. Arazi kullanım haritalarını oluşturabilmek için ENVI yazılımında düzenlenen uydu görüntülerine sınıflandırma işlemi uygulanmıştır. Arazi kullanım ve arazi örtüsü 5 sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflar; yerleşim alanı, yeşil alan, su alanı, tarım alanı ve çıplak alandır.

Çalışmada öncelikle elde edilen uydu görüntüleri kontrollü sınıflandırma metotlarından Maksimum Olabilirlik Yöntemi ile sınıflandırılmıştır. Maksimum Olabilirlik Yönteminin kullanılmasının en önemli nedenlerinden biri diğer kontrollü sınıflandırma yöntemlerine göre yerleşim alanına ait sınıfları yüksek doğruluk oranlarıyla sınıflandırabilmesidir. Aynı zamanda Maksimum Olabilirlik Yöntemi sınıflandırma çalışmalarında basit ve güçlü bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Sınıflandırılmış bütün görüntülerin doğruluk analizi, rastgele belirlenen 300'ün üzerindeki kontrol noktasının yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri ile karşılaştırılması sonucu elde edilmiştir. Doğruluk analizi sonucunda arazi kullanım ve arazi örtüsü haritalarının her bir sınıf için alansal olarak değişimleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değişimler sonucu değişim matrisi üretilmiştir. Değişim matrisi çalışma alanındaki temel değişim alanları hakkında bilgi vermektedir.

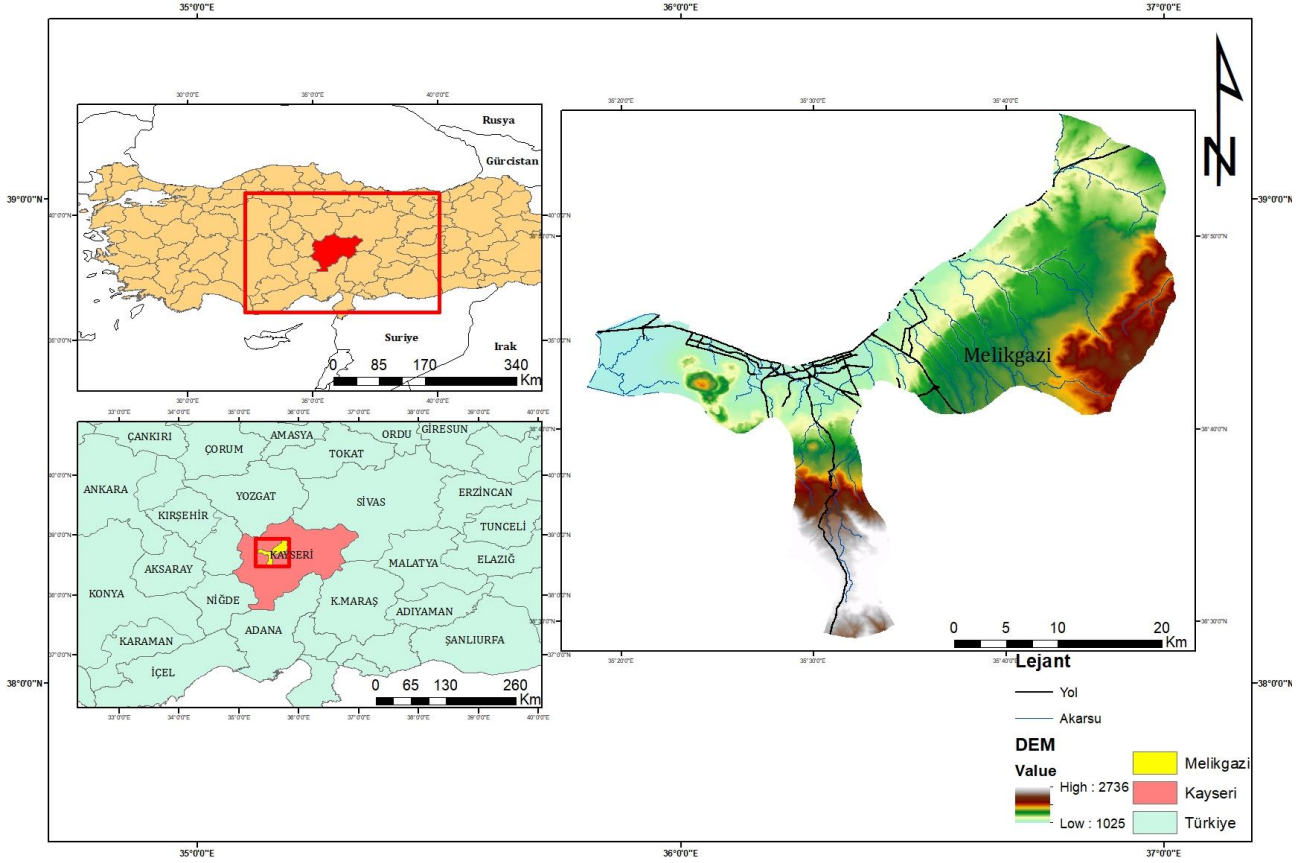


Şekil 1. Yöntem Akış Şeması

YSA-HO modeli gelecekteki arazi kullanım değişikliklerini tahmin etmek için uygulanmıştır. Modellemenin oluşturulabilmesi için gerekli olan girdi verileri, daha önceden yapılmış çalışmalardan yola çıkılarak yükseklik, eğim, akarsuyu uzaklık, kara yoluna uzaklık ve yerleşim alanına uzaklık olarak belirlenmiştir. Çalışmada girdi verisi olarak kullanılacak sayısal yükseklik modeli USGS Earth Explorer sitesinden indirilmiştir. Elde edilen sayısal yükseklik modeli kullanılarak ArcGIS 10.4 yazılımında bir diğer girdi verisi olan eğim haritası üretilmiştir. Akarsuyu verisi Copernicus Land Monitoring Service sitesinden ve kara yolu verisi Open Street Map (OSM) sitesinden elde edilmiştir. Akarsuyu ve kara yolu verilerini ArcGIS 10.4 yazılımı içinde bulunan Öklid Mesafe Yöntemini kullanarak uzaklık verileri elde edilmiştir. Yerleşim alanı verileri ise kontrollü sınıflandırma yöntemi kullanılarak sınıflandırılmış 2020 yılı yerleşim alanı sınıflandırma maskelenerek çıkarılmıştır. Önceki arazi kullanım durumları da referans alınarak gelecekteki arazi kullanım durumları modellenmiştir. 2000-2010 yıllarındaki veriler kullanılarak 2020 yılı için simülasyon modeli oluşturulmuş ve kullanılan simülasyon modelinin doğruluğunu, doğrulama doğruluğunu temsil eden kapa istatistikleri (standart kapa, kapa histogram ve kapa location) ile doğrulanmıştır. Modelin doğruluğu kanıtlandıktan sonra 2030 ve 2040 yıllarına ait tahmin modelleri simüle edilmiştir. Şekil 1’de yöntem akış şeması gösterilmektedir.

2.1. Çalışma Alanı

Melikgazi ilçesi İç Anadolu Bölgesinde bulunan Kayseri ilinde yer almaktadır. Kayseri ili 37° 45’ ile 38° 18’ kuzey enlemleri ve 34° 56’ ile 36° 58’ doğu boylamları arasında bulunmaktadır. Kayseri ili içerisinde bulunan Melikgazi ilçesi ilin en büyük ilçelerinden biridir. İlçenin yüzölçümü 440 km²’dir ve nüfusu 594.344 kişidir [20] (Şekil 2). Melikgazi ilçesi merkez şehrin büyük bir bölümünü kapsamaktadır ve ilçenin batısında İncesu, Hacılar ve Kocasinan ilçesinin bir kısmı, doğusunda Bünyan, güneyinde Talas ve kuzeyinde Kocasinan ilçesi yer almaktadır.



Şekil 2. Çalışma Alanı

2.2. Sınıflandırma

Sınıflandırma ham halde bulunan uydu görüntülerinin üzerindeki cisimlerin farklı spektral yansıtım değerlerini esas alarak görüntüdeki her elemanın ait olduğu sınıf özelliklerine atanması işlemidir. İşlenmemiş uydu görüntülerini yorumlanabilir verilere dönüştürmek için kullanılan bir tekniktir. Sınıflandırma yöntemleri nesne tabanlı ve piksel tabanlı olmak üzere iki ana bölüme ayrılır. Piksel tabanlı sınıflandırma yöntemlerinde görüntüdeki piksel değerleri kullanılırken, nesne tabanlı sınıflandırma yöntemlerinde ise yalnızca piksel değerleri değil piksellerin komşuluk özelliklerini yansıtan bilgileri de kullanan bir yöntemdir [5]. Bu çalışmada piksel tabanlı yöntemlerden kontrollü sınıflandırma metodlarından biri olan Maksimum Olabilirlik Yöntemi kullanılmıştır. Kontrollü sınıflandırma yöntemi kullanıcının bilgi ve deneyimini modele aktarabildiği için özellikle sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için kullanılmıştır. Maksimum Olabilirlik Yöntemi ise literatürde en sık kullanılan sınıflandırma yöntemidir.

Bu çalışmada arazi kullanım ve arazi örtüsü haritalarını oluşturabilmek için test verileri 5 sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflar; yerleşim alanı, yeşil alan, su alanı, tarım alanı ve çıplak alandır.

2.3. Doğruluk Analizi

Doğruluk analizi sınıflandırma sonucu elde edilen verilerin piksellerinin ait oldukları sınıflara atanıp atanmadığını tespit eden analiz yöntemidir. Piksellerin yanlış sınıflara atanması sınıflandırma hatasıdır [5]. Doğruluk analizinde sınıflandırılan görüntüler ile gerçek görüntüler karşılaştırılmaktadır. Çalışma alanına ait gerçek değerler hava fotoğrafları, uydu görüntüleri, saha çalışmaları ve topoğrafya görüntülerinden elde edilebilmektedir. Doğruluk analizi için her sınıfa ait referans verileri belirlenir ve bu referans verileri sınıflandırılmış görüntüler ile karşılaştırılarak hata matrisi oluşturulur [5]. Hata matrisinden elde edilen verilerle genel doğruluk ve Kappa İstatistiği değeri üretilir.

Genel doğruluk hata matrisindeki toplam piksel sayısının doğru sayısına bölünmesi ile hesaplanır [12]. Eşitlik 1'de genel doğruluk formülü gösterilmektedir.

$$Genel\ Doğruluk = \left(\frac{\sum A}{\sum B} \right) \times 100 \quad (1)$$

Eşitlikte A, ait oldukları doğru sınıfa atanan toplam piksel sayısını, B ise gerçekten bu sınıflara ait olan toplam piksel sayısını ifade etmektedir. Bir sınıfa ait doğru piksellerin sayısı, bulunduğu sütundaki tüm piksellere bölünürse kullanıcı doğruluğu; bir sınıf içindeki tüm piksellerin sayısı bulunduğu satırdaki tüm piksellerin sayısına bölünürse üretici doğruluğu elde edilmiş olur [13].

Doğruluk analizinde kullanılan bir diğer ölçüt Kappa katsayısıdır. Kappa katsayısı hesaplanırken hata matrisinin tüm elemanları kullanılır. Eşitlik 2'de Kappa katsayısı formülü gösterilmektedir.

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r [(x_{i+})x(x_{+i})]}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+})x(x_{+i})} \quad (2)$$

Eşitlikte;

K: Kappa Katsayısı

r: Hata matrisindeki satır sayısı

xii: Satır (i.) ve Sütundaki (i.) toplam örnek sayısı

xi+: i. satırın toplam değeri

x+i: i. sütunun toplam değeri

N: Matristeki toplam örnek sayısıdır.

Genel doğruluk oranının %80'den ve Kappa İstatistiği değerinin 0.8'den büyük olması durumunda doğruluk analizi başarılı kabul edilir yani yapılmış olan sınıflandırma doğru kabul edilir [6].

2.3.1. Simülasyon Modeli Doğruluk Analizi

Simülasyon modeli doğruluk analizi Hücresel Otomat ile oluşturulmuş simülasyon görüntülerinin sonuçlarının doğrulanmasını sağlar. Simülasyonu oluşturulan arazi kullanım haritasının doğruluğunu doğrulamak için sınıflandırılmış arazi kullanım haritalarını temsil eden referans verilerin kullanılmasıyla oluşturulur [21]. Simülasyonun bağımlı değişkenleri olarak da bilinen sınıflandırılmış (t1) ve (t2) zaman dilimindeki arazi kullanım haritaları tarafından kontrol edilir. (t2) zamanında sınıflandırılan arazi kullanım haritası ile MOLUSCE tarafından simüle edilen (t2') zamanının karşılaştırılması ile doğruluk analizi gerçekleştirilir.

Doğrulama sonuçları; kappa histogramı, yerel kappa ve 0-1 aralığında değerler alan genel kappa olmak üzere istatistiksel katsayılarla ifade edilir. p_{ij} , değeri rastgele bir grid tablosunun i, j'inci hücresi, p_{it} , değeri i'inci grid satırındaki tüm hücrelerin toplamı, p_{tj} , değeri j'inci grid sütunundaki tüm hücrelerin toplamı ve c raster kategorilerinin sayısını temsil etmektedir [21]. Kappa katsayıları aşağıdaki eşitliklerdeki gibi hesaplanmaktadır:

$$P(A) = \sum_{i=1}^c p_{ij} \quad (3)$$

$$P(E) = \sum_{i=1}^c p_{it} p_{tj} \quad (4)$$

$$P_{max} = \min (p_{it} p_{tj}) \quad (5)$$

$$K_o = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)} \quad (6)$$

$$K_{Loc} = \frac{P(A) - P(E)}{P_{max} - P(E)} \quad (7)$$

$$K_{Hist} = \frac{P_{max} - P(E)}{1 - P(E)} \quad (8)$$

2.4. Değişim Analizi

Değişim analizi farklı zamanlarda aynı bölgeye ait olan iki ya da daha fazla görüntünün çevresel değişimlerinin incelenmesi tekniğidir [7]. Arazi kullanım ve arazi örtüsü doğal ve yapay etkenlerden dolayı sürekli değişim ve gelişim içerisindedir. Değişim bilgilerinin elde edilebilmesi ve ileriye dönük tahmin modelleri oluşturulabilmesi için bu değişimlerin izlenmesi önemlidir [8].

2.5. Simülasyon Yöntemleri

Simülasyon modelleri kırsal ve kentsel alanlardaki değişimlerin incelenmesi ve planlı çalışmalar yapılması konusunda önemli faydalar sağlamaktadır [9]. Karmaşık kent yapısının modellenmesinde kullanılan çözümü zor olan simülasyon hesaplamaları gelişen teknoloji ile birlikte bilgisayar ortamında yapılabilmesi büyük kolaylık sağlamaktadır [10]. Simülasyon modelleri sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin oluşturulmasında, geleceğe yönelik planlamaların yapılmasında ve değerlendirilmesinde büyük rol oynamaktadır.

Simülasyon yöntemlerinde güncel veri elde etme konusunda uzaktan algılama teknikleri büyük katkı sağlamaktadır. Farklı çözünürlüklerde, farklı zamanlara ait veriler elde edilebilmesi ve verileri işleme konusunda sağladığı kolaylıklar ile simülasyon yöntemlerinin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Coğrafi bilgi sistemleri ise güçlü analitik becerilerle mevcut durumu incelemek ve planlama çalışmalarına yönelik önemli araçlar sağlamaktadır [11]. Simülasyon yöntemleri ise bu iki teknikten elde edilen verilerle gelecekte olabilecek değişimleri modelleyerek etkin planlama çalışmaları oluşturulmasına katkı sağlar.

Simülasyon yöntemleri iki başlıkta ele alınır. İlki kentsel büyüme modelleri; Von Thünen Modeli, Eş Merkezli Bölgeleme Teorisi, Merkez Alan Teorisi ve Sektör Teorisidir. İkincisi ise günümüzde ise kentsel büyüme, arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişimlerinin modellenenebilmesi için; Hücresel Otomat (HO), Yapay Sinir Ağları (YSA), Markov Zincirleri, SLEUTH Modeli gibi birçok simülasyon yöntemi ortaya çıkmıştır [11].

Bu çalışma kapsamında Yapay Sinir Ağları ve Hücresel Otomat yönteminin entegre bir şekilde kullanıldığı QGIS yazılımının MOLUSCE eklentisi kullanılmıştır.

2.5.1. Yapay Sinir Ağları

Yapay Sinir Ağları insan beyninin yapısını esas alarak, bilgisayar ortamına bu modeli aktaran ve doğal ortamı matematiksel temellere dayalı bir şekilde taklit eden modellerdir [9]. Yapay Sinir Ağları giriş, gizli katman ve çıkış olmak üzere üç katmandan oluşan nöron yapılarından meydana gelmektedir. Nöronlardan oluşan bu katmanlar birbirlerine ağırlık bağlantıları ile bağlıdır [9]. Birbirlerine hiyerarşik bir şekilde bağlanan girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanı sinir ağı modelini oluşturmaktadır. Yapay sinir ağları girdi değerlerini alır ve bu girdi değerlerini ağırlıklarla çarparak bir fonksiyona sokar ve çıktı değerini üretir.

Yapay sinir ağlarının eğitimi genellikle geri yayılım algoritması kullanılarak yapılır. Ağın çıktıları ile beklenen çıktıların karşılaştırılmasıyla başlar ve bu hataların ağıdaki her bir bağlantıya geriye doğru yayılmasını sağlar. Bu sayede ağıdaki bağlantıların ağırlıkları eğitim verisiyle uyumlu hale getirilir. Yapay Sinir Ağları geçmiş ile gelecek arasındaki ilişkileri tahmin ederek gelecek hakkında tahmin haritaları oluşturabilmektedir. Model veri setleriyle eğitilerek, yeni sınıflar oluşturularak farklı sınıflara ait arazi kullanım ve arazi örtüsü haritaları üretebilmektedir [9].

2.5.2. Hücresel Otomat

Otomat kavramı ilk olarak 1930'lu yıllarda bilgisayarın temel çalışma prensiplerini belirleyen Evrensel Turing Makinesi, Alan M. Turing'e atfedilerek ortaya çıkmıştır. İlerleyen aşamada John von Neumann ve Stanislaw Ulam ile birlikte Hücresel Otomat'ı bulmuştur. 1970 yılında John Horton Conway "Hayat Oyunu (Game of Life)" olarak isimlendirdiği geniş çapta bilinen Hücresel Otomat'ı geliştirmiştir [10]. Hayat oyununun evreni, sonsuz ve iki boyutlu gridin oluşturduğu ölü veya diri hücrelerdir. Her hücre yatay, dikey veya çapraz olarak bitişik sekiz komşusuyla direkt olarak etkileşimde bulunmaktadır. Model içinde bulunan bir hücrenin durumunu belirlemek için komşu sekiz hücreden bilgi alınır. Herhangi bir hücre için, her aşamada aşağıdaki değişikliklerden biri gerçekleşmektedir [10]. Bir canlı hücrenin, iki ya da üç canlı komşusu varsa değişmeden bir sonraki nesle kalır,

1. Bir canlı hücrenin, üçten daha fazla canlı komşusu varsa kalabalıklaşma nedeniyle ölür,
2. Bir canlı hücrenin, ikiden daha az canlı komşusu varsa yalnızlık nedeniyle ölür,

3. Bir ölü hücrenin tam olarak üç canlı komşusu varsa canlanır.

Her bir hücrenin gelişimi çevresindeki hücrelere bağlıdır ve Hücresel Otomat yöntemi ile her bir hücrenin ileriye yönelik mekânsal gelişimi çevresindeki hücreler ile tahmin edilebilmektedir. Hücresel Otomat yöntemi mekânsaldır ve basit kurallar sayesinde karmaşık modeller üretebilmektedir bu özelliklerinden dolayı kentsel büyüme simülasyonlarında etkin bir şekilde kullanılabilir.

2.5.3. Yapay Sinir Ağları ve Hücresel Otomat

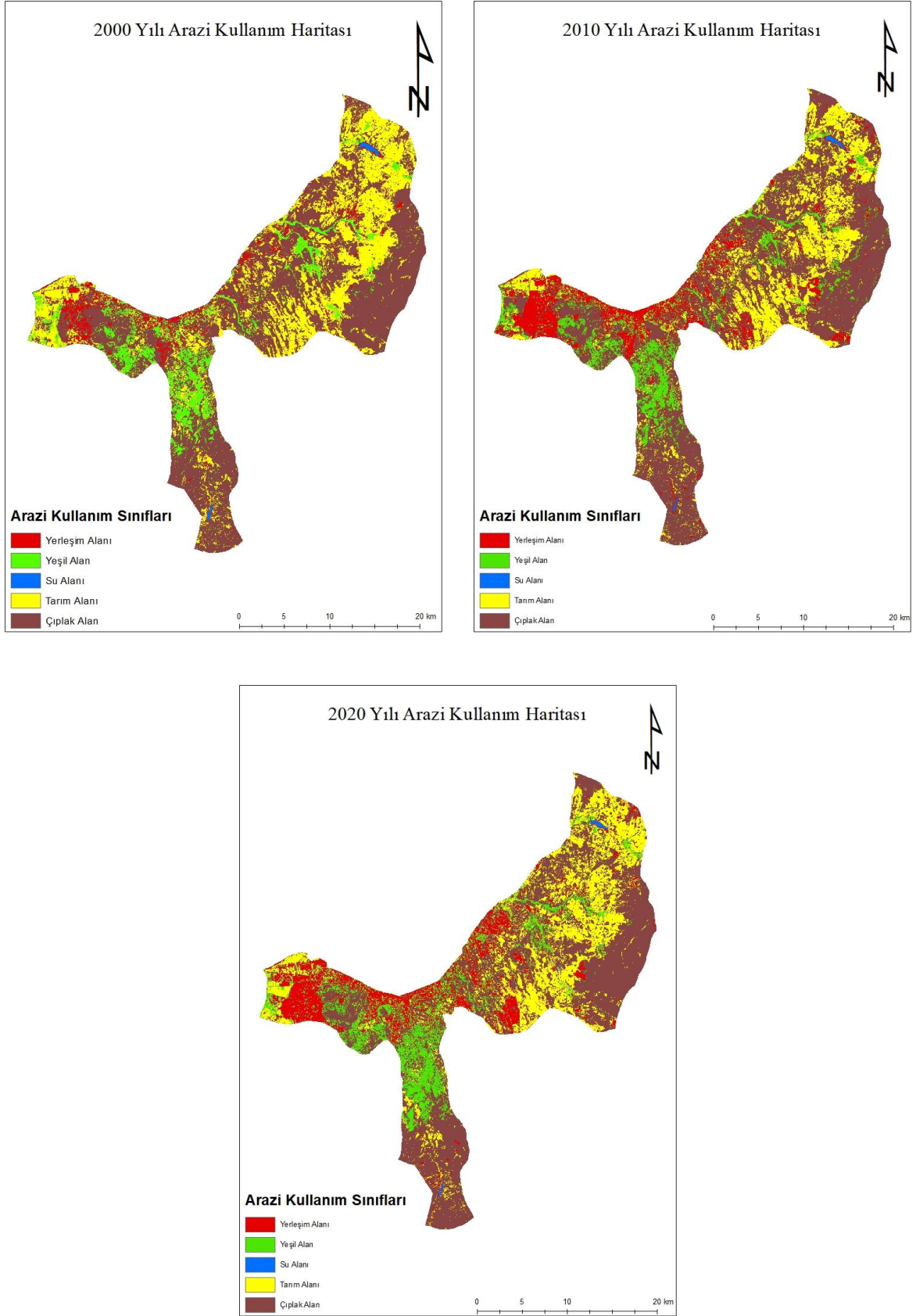
Yapay sinir ağları ve hücresel otomat, kentsel büyüme simülasyon modellerinde birbirleriyle entegre bir şekilde kullanıldığında, birbirlerinin avantajlarını birleştirerek daha güçlü ve etkili bir model oluşturmaktadır. Yapay sinir ağları doğrusal olmayan problemlerin çözümünde en sık kullanılan yöntemlerden biridir. Model yapay sinir ağlarını kullanarak insan ve doğa arasındaki karmaşık yapıyı çözümlenerek gelişim olasılıklarını hesaplar [14]. Simülasyon çalışmalarında hücresel otomatın entegrasyonu son yıllarda özellikle kentsel büyüme alanında artış göstermiştir [9]. Hücresel otomatlar kent dokusu, arazi kullanımı ve kentsel gelişim gibi faktörleri modellemek için kullanılmaktadır. Her hücre çevresindeki hücrelerin durumunu dikkate alarak kent içindeki büyüme ve gelişimi simüle edebilirler.

Yapay sinir ağları ve hücresel otomat yönteminin birlikte kullanımı, kent planlaması açısından doğru, etkili ve sürdürülebilir kararlar alınmasına yardımcı olabilirler. Bu iki yöntemin entegre bir şekilde kullanılması özellikle kentsel alanların gelecekte gelişiminin daha iyi anlaşılmasına ve sürdürülebilir şehirler oluşturulması için uygun stratejiler geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü Değişiklik Tespiti

2000, 2010 ve 2020 yılına ait arazi kullanım ve arazi örtüsü haritaları Landsat uydu görüntüleri kullanılarak, kontrollü sınıflandırma metodlarından Maksimum Olabilirlik Yöntemi ile sınıflandırılmışlardır. Sınıflandırılmış görüntüler Şekil 3.'te sırasıyla gösterilmektedir. Sınıflandırılmış görüntüleri kullanabilmek için doğruluk belirleme işleminin yapılması gerekmektedir.



Şekil 3. 2000, 2010 ve 2020 Yılı Arazi Kullanım Haritası

2000, 2010 ve 2020 yıllarına ait doğruluk tespiti için üretilen arazi kullanım haritalarından 300'ün üzerinde rastgele kontrol noktası belirlenmiştir ve her bir nokta Google Earth Pro yazılımı yardımıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda hata matrisleri oluşturularak doğruluk oranları hesaplanmıştır. 2000, 2010 ve 2020 yıllarına ait genel doğruluk oranları sırasıyla %91.32, %90.41 ve %91.16 olarak hesaplanmıştır. Kappa katsayıları

2000, 2010 ve 2020 yılları için sırasıyla 0.86, 0.84 ve 0.87 olarak tespit edilmiştir. Tablo 1’de yıllara göre doğruluk oranları gösterilmektedir. Elde edilen doğruluk değerleri sınıflandırma çalışmasının standartlara uygun yapıldığını göstermektedir.

Tablo 1. 2000,2010 ve 2020 Doğruluk Oranları

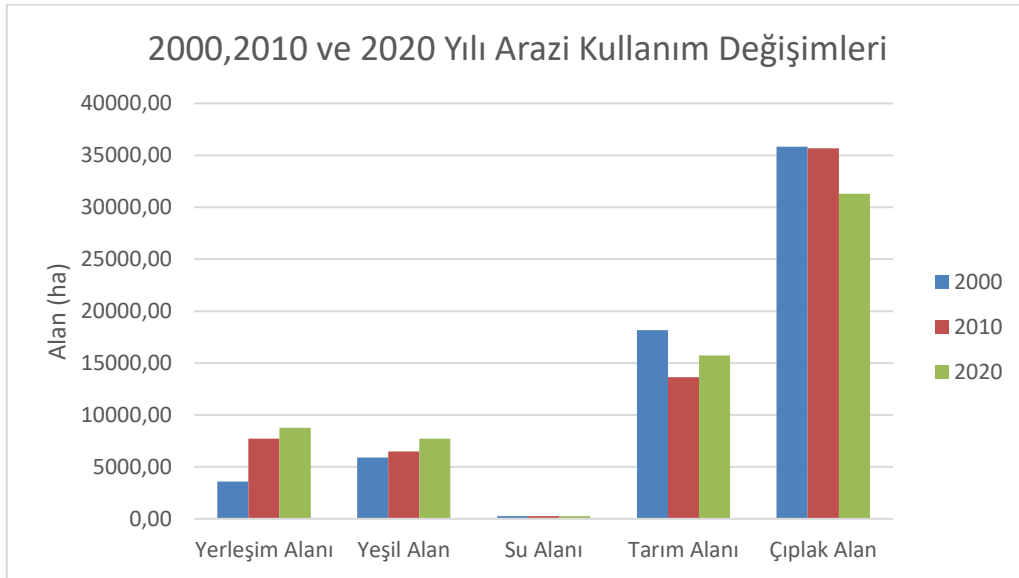
Yıl	Genel Doğruluk (%)	Kappa
2000	91.32	0.86
2010	90.41	0.84
2020	91.16	0.87

Bu çalışma kapsamında Melikgazi ilçesinde geçmişten günümüze (2000-2020) arazi kullanımı ve arazi örtüsünde meydana gelen değişimler belirlenmiştir. 20 yıllık değişim analizi için ArcGIS yazılımı kullanılmıştır. Tablo 1.’de 2000 yılından, 2020 yılına kadar arazi kullanım ve arazi örtüsü değişim matrisi gösterilmektedir.

20 yıllık süreçte önemli değişikliklerin gerçekleştiğini söylemek mümkündür. Yerleşim alanı 2000 yılında 3599 hektar iken 2020 yılında 8761 hektara çıkmıştır. 20 yıllık süreçte yerleşim alanında %143’lük bir artış yaşanmıştır. Bu artışın en önemli nedenlerinden biri Kayseri’nin bir sanayi şehri olmasıdır ve sanayi bölgelerinin Melikgazi ilçesi içerisinde yer almasıdır. İlçenin batı kesiminde yıllar içinde gelişip büyüyen Kayseri Organize Sanayi Bölgesi ve ilçenin güney kesiminde yeni kurulan Mimar Sinan Organize Sanayi bölgesi yer almaktadır. İki büyük sanayi bölgesine ev sahipliği yapan ilçe iş imkanlarının fazla olmasından kaynaklı ilçe merkezi ve çevresinde yerleşim alanlarının artışına sebep olmuştur.

Tablo incelendiğinde yeşil alanlarda artış görülmektedir bunun en büyük sebeplerinden biri Kayseri’de bağ olarak adlandırılan sayfiye alanlarının artması ve mesire alanlarında iyileştirilmeye gidilmesidir. Özellikle yaz aylarında bağ yerleşimlerinde artan ekim ve dikim faaliyetleriyle birlikte yeşil alanlarda artışa neden olmuştur. Melikgazi ilçesi sınırları içinde bulunan Tekir Gölet’i ve Sarımsaklı Barajı su alanı sınıfına dahil edilmiştir. Su alanlarında gözlemlenen %7’lik azalışın önemli nedenlerinden biri ilçe yerleşim alanının hızlı artışıdır. Diğer etken ise iklim değişikliğidir yazların çok sıcak geçmesiyle azalan su miktarının, sonbahar ve kış aylarının az yağışlı ve kısa sürmesiyle yerine konulamaması su alanında azalışı tetiklemiştir.

Tarım alanlarında görülen %13’lük azalışın bir kısmı yerleşim alanlarına geçmiş bir kısmı ise çıplak alana dönüşmüştür. Değişim matrisi incelendiğinde yeşil alana da geçiş olduğu görülmekte bunun nedeni tarım alanları ile yeşil alanların piksel yansıtım değerlerinin birbirlerine yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Çıplak alanlarda ise %12’lik bir azalış tespit edilmiştir.



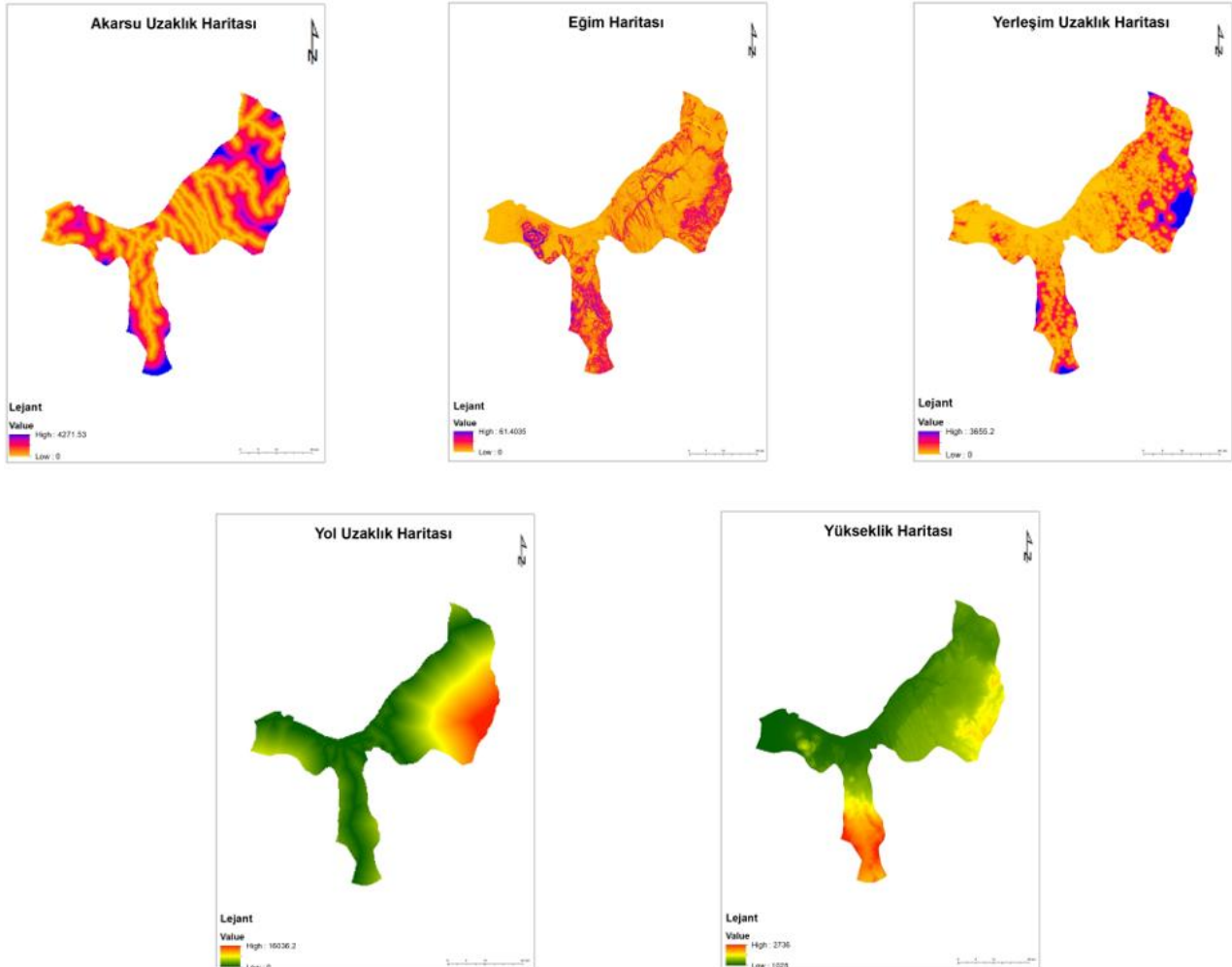
Şekil 4. 2000, 2010 ve 2020 Yılı Arazi Kullanım Değişimleri [ha]

Tablo 2. 2000 ve 2020 Yılı Değişim Matrisi

		2000 Yılı					
		Yerleşim Alanı	Yeşil Alan	Su Alanı	Tarım Alanı	Çıplak Alan	Toplam
2020 Yılı	Yerleşim Alanı	2091.08	563.92	119.46	1900.68	4086.54	8761.67
	Yeşil Alan	316.91	3677.65	15.66	1321.53	2389.51	7721.27
	Su Alanı	13.43	10.19	110.95	34.91	84.54	254.01
	Tarım Alanı	703.27	528.81	15.62	10377.84	4095.21	15720.74
	Çıplak Alan	474.54	1105.05	11.64	4534.45	25178.17	31303.84
	Toplam	3599.22	5885.62	273.32	18169.40	35833.97	63761.53
	Görüntü Farkı (ha)	5162.45	1835.65	-19.31	-2448.66	-4530.13	0.00
Görüntü Farkı (%)	143.43	31.19	-7.06	-13.48	-12.64		

3.2. Arazi Kullanım Simülasyonu

Geleceğe yönelik tahmin modelinin oluşturulabilmesi için daha önce hazırlanmış olan 2000, 2010 ve 2020 yıllarına ait arazi kullanım haritaları ve girdi verileri olan yükseklik, eğim, yola uzaklık, akarsu uzaklığı ve yerleşim alanlarına uzaklık verileri kullanılmıştır (Şekil 4.). Simülasyon modeli oluşturmak için pek çok modül bulunmaktadır ve bu çalışmada QGIS yazılımı içerisinde bulunan MOLUSCE eklentisi kullanılmıştır. MOLUSCE Yapay Sinir Ağları ve Hücresel Otomat yöntemini birlikte kullanarak daha sağlıklı simülasyon verileri elde edilmesini sağlamaktadır.

**Şekil 5.** Simülasyon girdi verileri

Melikgazi ilçesine ait 2030 ve 2040 yıllarına ait tahmin modellerini oluşturabilmek için öncelikle 2000, 2010 ve 2020 yılı arazi kullanım haritaları kullanılarak model doğrulama çalışması yapılmıştır. 2000 ve 2010 yılı verilerinden yola çıkarak 2020 yılı için bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Modellemesi yapılan 2020 yılı arazi kullanım haritası ile 2020 yılı gerçek arazi kullanım haritası karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda 2020 yılı arazi kullanım simülasyonuna ait Kappa İstatistiği değeri 0.86 olarak hesaplanmıştır. Simülasyon modeli için genel doğruluk oranı %91.13 olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar geleceğe yönelik modelle oluşturulabilmesinin uygun olduğunu göstermektedir. Tablo 2.'de değerlendirme oranları gösterilmektedir.

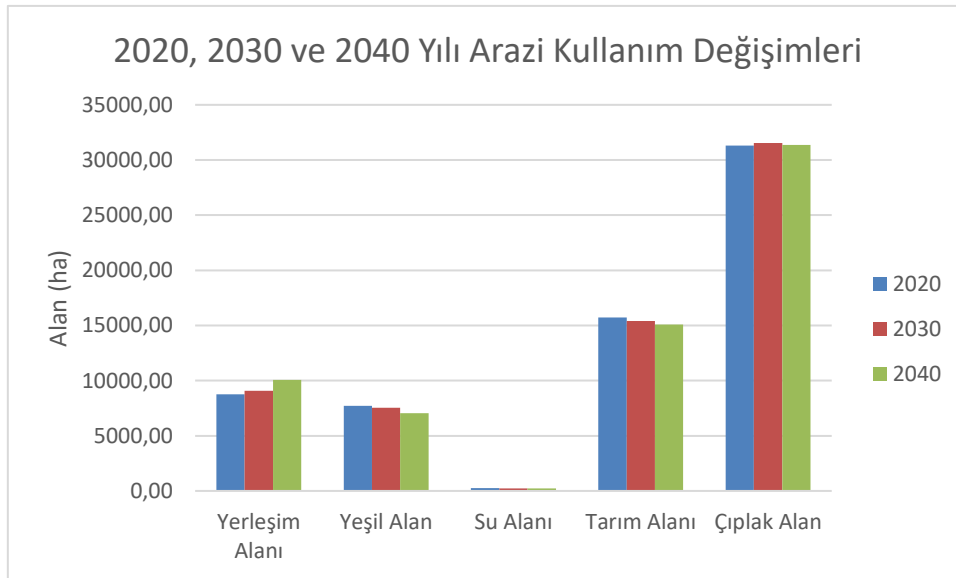
Tablo 3. Simülasyon Doğruluk Değerlendirmesi

2020 Yılı Arazi Kullanım Simülasyon Modeli Ölçütleri	Değerler
Doğruluk Yüzdesi (%)	91.13
Kappa (overall)	0.81
Kappa (histogram)	0.93
Kappa (location)	0.86

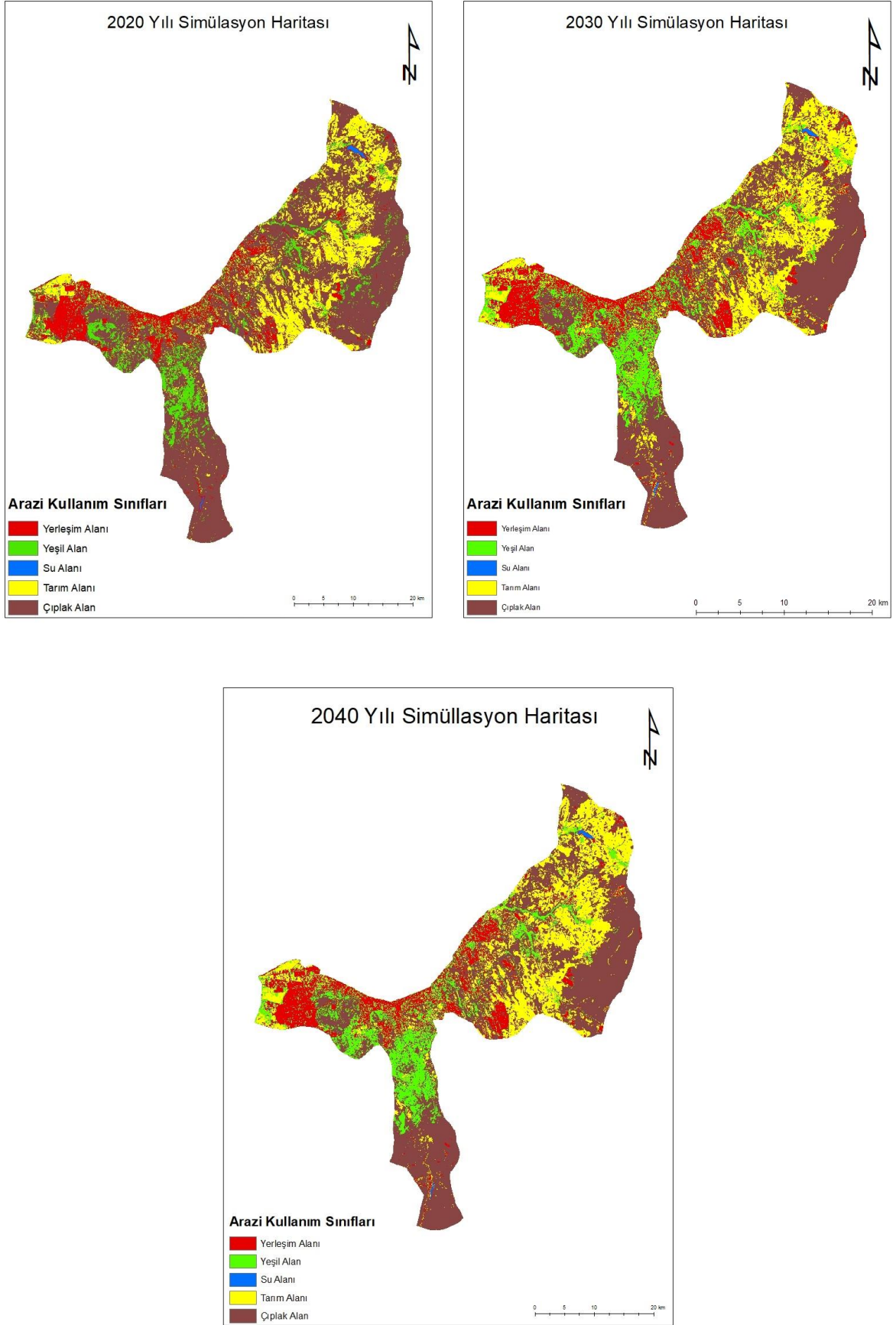
2000, 2010 ve 2020 yıllarına ait arazi kullanım haritaları kullanılarak 2030 ve 2040 yılları için simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Şekil 3.'te simülasyon modelleri gösterilmektedir. Modelleme sonuçlarında yerleşim alanlarında artışın devam edeceği gözlemlenmiştir. 2020 yılında %13'lük bir yer kaplayan yerleşim alanı 2030 yılında %14, 2040 yılında %15'lik bir alan kaplayacağı tahmin edilmiştir. 2020 yılında 15727 hektarlık alanı kaplayan tarım alanları 2030 yılında 15398 hektara ve 2040 yılında 15100 hektara düşmektedir. Burada yaşanan azalışım yerleşim alanlarına dönüştüğü tahmin edilmektedir. Her yıl olduğu gibi 2030 ve 2040 yıllarında da su alanlarında azalış olacağı modellenmiştir. Tablo 4.'te 2020, 2030 ve 2040 yılları arasındaki arazi kullanım değişim değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4. 2020, 2030 ve 2040 Yılı Arasındaki Değişim

Sınıflar	2020 Yılı Arazi Kullanım		2030 Yılı Simülasyon		2040 Yılı Simülasyon	
	ha	%	ha	%	ha	%
Yerleşim Alanı	8769.98	13.74	9069.98	14.21	10069.98	15.75
Yeşil Alan	7727.31	12.11	7546.60	11.83	7046.66	11.04
Su Alanı	254.06	0.4	236.42	0.37	218.60	0.34
Tarım Alanı	15727.59	24.65	15398.69	24.13	15100.35	23.67
Çıplak Alan	31316.15	49.09	31543.40	49.44	31359.51	49.16



Şekil 6. 2020, 2030 ve 2040 Yılı Arazi Kullanım Değişimleri [ha]



Şekil 7. 2020,2030 ve 2040 Yılı Simülasyon Modeli

4. Sonuç

Gelişen ve değişen yaşam koşullarıyla birlikte artan nüfus ve hızlı kentleşme gibi etkenler, arazi kullanım ve arazi örtüsü yapısında önemli değişimlere sebep olmaktadır. Yerleşme alanlarında yaşanan artış, ekonomik büyüme ve sanayi alanlarının artması doğal ekosistemleri olumsuz etkilemektedir. Arazi kullanımındaki değişimler yalnızca fiziki değil sosyal, kültürel etmenleri de büyük ölçüde etkilemektedir. Sürdürülebilir kentlere sahip olabilmek için daha planlı çalışmalar yapılmalı ve arazi kullanımında meydana gelen değişimler tespit edilmelidir. Bunlardan yola çıkarak Melikgazi ilçesinin arazi kullanım değişimleri analiz edilmiş ve geleceğe yönelik tahmin modelleri oluşturulmuştur.

Melikgazi ilçesinde 2000 yılından bu yana yerleşim alanlarında büyük oranda artış yaşanmıştır. Özellikle sanayi bölgelerinin hızla gelişmesi ve iş imkanlarının artışı ilçenin hızlı bir şekilde gelişip, değiştiğini göstermektedir. Oluşturulan simülasyon modellerinde bu artışın devam edeceği görülmüştür. İlçe merkezinde oluşan nüfus baskısıyla beraber yerleşim alanlarının merkezden çevreye yayılması sonucunda tarım alanlarında azalış yaşandığı görülmüştür ve elde edilen simülasyon modellerinde ise aynı durumun devam edeceği tahmin edilmiştir.

Bu çalışma arazi örtüsü ve arazi kullanımı ile ilgili geleceğe yönelik planlama çalışmaları yapılırken nasıl ilerlenmesi gerektiğiyle ilgili önemli bilgiler vermektedir. Geleceğe yönelik simülasyon modelleriyle ilgili farklı modelleri entegre ederek yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. Ancak Yapay Sinir Ağları ve Hüresel Otomat yönteminin bir arada kullanıldığı çok az çalışma vardır. Özellikle QGIS yazılımının MOLUSCE eklentisi çalışmalarda yeni yeni kullanılmaya başlamıştır. Hızlı ve etkili sonuçlar elde etmeye yarayan bu eklenti planlama çalışmaları için büyük bir potansiyele sahiptir. Melikgazi ilçesi özelinde böyle bir çalışmaya araştırmalar sonucunda rastlanmamıştır ve ilçe içinde önemli bir veri kaynağıdır.

Kaynakça

- [1] Perović, V., Jakšić, D., Jaramaz, D., Koković, N., Čakmak, D., Mitrović, M., & Pavlović, P., 2018. Spatio-temporal analysis of land use/land cover change and its effects on soil erosion (Case study in the Oplenac wine-producing area, Serbia). *Environ Monit Assess* (2018)190, 675.
- [2] United Nations, 2018. Urbanization. <https://www.un.org/development/desa/pd/content/urbanization-0> (Erişim Tarihi: 20.12.2023)
- [3] Bolat, S., Doğan, M., 2022. Uzun Dönemli (1984-2020) Arazi Kullanımı Değişiminin Tespiti ve Modellemesi (2035): Gölcük İlçesi'nin Analizi, *Coğrafya Dergisi*, 44: 169-181.
- [4] Tawfeeq, A., F., Kurban, T., 2022. Hüresel Otomata markov zincir yöntemi ile kentsel yayılmanın modellenmesi: Kerkük ili örneği, *Geomatik Dergisi*, 7 (1): 58-70.
- [5] Sunar, F., Özkan, C., Osmanoğlu, B., 2018. Uzaktan Algılama. Anadolu Üniversitesi, Eskişehir. 220 s.
- [6] Karayol, Ö., 2012. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Arazi Kullanım Değişimlerinin İzlenmesi: Konya Örneği. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 105s, Kayseri.
- [7] Kayman, Ö., 2015. Spektral İndekslerin Arazi Örtüsü/Arazi Kullanımı Sınıflandırmasına Etkisi: İstanbul, Beylikdüzü İlçesi, Arazi Kullanımı Değişimi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 123 s, İstanbul.
- [8] Baysal, D., 2006. Eskişehir Kentsel Yerleşim Alanının Farklı Yıllara Ait Fiziksel Değişiminin Uzaktan Algılama Yöntemi İle Değerlendirilmesi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 89 s, Eskişehir.
- [9] Çağlıyan, A., Dağlı, D., 2014. Arazi Kullanımında Simülasyon Modelleri ve Entegre Kullanımları, TÜCAUM VIII. Coğrafya Sempozyumu, Ekim 2014, Ankara.
- [10] Ayazlı, İ., E., Batuk F., Demir, H., 2011. Kentsel Yayılma Simülasyon Modelleri ve Hüresel Otomat, 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 18-22 Nisan 2011, Ankara.
- [11] Yazıcı, A., D., Öztürk, D., Ayazlı, İ., E., 2019. Kentsel Büyümenin Modellenmesi ve Simülasyon Modelleri, *International Journal of Multidisciplinary Studies an Inovative Technologies*, 3 (1): 44 – 47.
- [12] Kılar, H., 2012. Antalya Kıyıları ve Çevresinin Zamansal Değişiminin Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Analizi, Sakarya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 101 s, Sakarya.
- [13] Kaya, M., 2020. Gediz Deltası ve Yakın Çevresinde Zamansal Değişimin Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri İle Analizi, Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 121 s., İstanbul.
- [14] Şahin, E., 2021. Kentsel Büyüme Simülasyon Modelleri, *International Geoinformatics Student Symposium*, 28-29 Haziran 2021, Mersin.
- [15] Bolat, S., Doğan, M., 2022. Uzun Dönemli (1984-2020) Arazi Kullanımı Değişiminin Tespiti ve Modellemesi (2035): Gölcük İlçesi'nin Analizi, *Coğrafya Dergisi*, (44): 169-181.
- [16] Karip, G., Göksel, Ç., 2017. İğneada koruma alanının arazi örtüsü/arazi kullanımının zamana bağlı değişiminin markov zincirleri ile modellenmesi, *Geomatik Dergisi*, 2 (2): 94-105.

- [17] Kafy, A., Naim, H., Subramanyam, G., Faisal, A., Ahmed, N., U., Rakip, A., Kona, M., A., Sattar, G., S., 2021. Cellular Automata Approach in Dynamic Modelling of Land Cover Changes Using RapidEye Images in Dhaka, Bangladesh, *Environmental Challenges*, 4, 1-15.
- [18] Canpolat, F., A., Dağlı, D., 2020. Elazığ İli'nde Arazi Kullanım Değişimi (2006-2018) ve Simülasyonu (2030), *International Journal of Geography and Geography Education*, 42: 702-723.
- [19] Aydın, O., 2011. CBS Temelli Hücresel Otomata Yöntemiyle Kentsel Büyüme Modeli: Ankara Örneği, *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 9 (2): 135-157.
- [20] Anonim, Kayseri İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü web sitesi. <https://kayseri.ktb.gov.tr/> (Erişim Tarihi: 20.12.2023)
- [21] Blissag, B., Yebdri, D., Kessar, C., 2024. Spatiotemporal Change Analysis of LULC Using Remote Sensing and CA-ANN Approach in the Hodna Basin, NE of Algeria, *Physics and Chemistry of the Earth*, 133: 1-13.

Detection of Retinal Diseases from Fundus Images Using Deep Learning and Adaptive Histogram Equality

Ali Emre Gök^{*1} , Şakir Taşdemir² 

^{*1} Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Faculty of Engineering and Architecture, Computer Engineering, NEVŞEHİR

² Selcuk University, Faculty of Technology, Computer Engineering, KONYA

(Alınış / Received: 29.01.2024, Kabul / Accepted: 01.04.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

Keywords

Deep Learning,
Diabetic Retinopathy,
Cataracts,
Glaucoma,
Image Classification

Abstract: Recently, various eye diseases such as cataracts, diabetic retinopathy, glaucoma, macular edema, myopia, and astigmatism have been seen frequently. Cataracts, diabetic retinopathy, and glaucoma cause blurred vision, loss of vision, and blindness in cases where they are left untreated and undiagnosed. Lack of experts and equipment, hardware problems, and erroneous decisions made by experts cause problems in the diagnosis process. Because of these reasons, computer-aided diagnosis systems that can diagnose accurately are required. Deep learning algorithms performed well in the field of health, recently. These results show that deep learning algorithms can be used in the diagnosis of eye diseases. In this study, various CNN models were used for classifying eye diseases such as cataracts, diabetic retinopathy, and glaucoma from fundus images. In the image preprocessing stage, the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization method was used. Experimental results demonstrate that VGG16 was the most successful model among the evaluated models in this study and the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization method increased the performance.

Derin Öğrenme ve Adaptif Histogram Eşitleme Kullanarak Retinal Hastalıkların Fundus Görüntülerinden Tespiti

Anahtar Kelimeler

Derin öğrenme,
Diyabetik retinopati,
Katarakt,
Glokom,
Görüntü sınıflandırma

Öz: Günümüzde, katarakt, diyabetik retinopati, glokom, maküler ödem, miyop ve astigmat gibi çeşitli göz hastalıkları sıklıkla görülmektedir. Bu hastalıklardan katarakt, diyabetik retinopati ve glokom, teşhis ve tedavi edilmedikleri durumlarda, bulanık görmeye, görme kaybına ve hatta körlüğe neden olmaktadır. Uzman ve donanım eksikliği, donanımsal problemler ve uzmanlarca verilen hatalı kararlar gibi çeşitli nedenlerle, teşhis aşamasında sorunlarla karşılaşılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, Bilgisayar Destekli Teşhis sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Son zamanlarda, derin öğrenme algoritmalarıyla gerçekleştirilen çalışmalarda, başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu başarılı sonuçlar, derin öğrenmenin, göz hastalıklarının teşhisinde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, çeşitli CNN modelleri kullanılarak, fundus görüntüleri üzerinden, katarakt, diyabetik retinopati ve glokom gibi göz hastalıklarının sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Fundus görüntülerinde, Kontrast Sınırlı Adaptif Histogram Eşitleme yöntemi kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, VGG16 modelinin, bu üç model arasında en başarılı model olduğunu ve Kontrast Sınırlı Adaptif Histogram Eşitleme yönteminin de performansı arttırdığını göstermektedir.

*İlgili Yazar, email: aliemregok@nevsehir.edu.tr

1. Introduction

Diabetes is an increasingly common disease today that poses a risk, especially for people between the ages of 40-59. It is a disorder caused by irregular changes in the amount of glucose in the blood, which provides energy for the activities in the body. The disease affects every individual in developed or developing countries with various levels of healthcare. It is estimated that the number of diabetic patients will reach 629 million around the world by 2045. High levels of blood sugar cause this excess glucose to accumulate in the vessels and block blood flow to the organs and result in various diseases [1].

Diabetic retinopathy (DR) is one of the diseases caused by diabetes and is becoming common day by day [1, 2]. It is estimated that DR, which is among the most important eye diseases causing visual impairment, will be seen in two hundred million people in 2040 [3, 4]. DR, a microvascular disease that develops over time [2, 5], is seen in people who have had diabetes for at least 10 years and have not had a proper eye examination during this period [1]. DR results from the loss of function of the cells in the back of the eye, which are responsible for sensing light and sending signals to the brain, due to damage to the blood vessels in that area because of diabetes [6-8]. In general, the vessels become occluded and become abnormally visible on the retina, while conditions like swelling or leakage of damaged vessels are seen in large cases [7]. Depending on the damage, visual disturbances or loss of vision are experienced [6, 7]. The most obvious and general symptoms used in the diagnosis of DR are exudates. Exudate is secreted at the points where bleeding occurs due to damage to the vessels. The size, shape, etc. characteristics of these secreted exudates indicate the stage of DR [7]. Fundus images of DR and healthy eyes are shown in Figure 1.

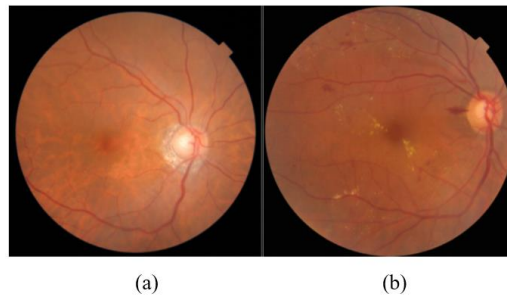


Figure 1. Fundus images of healthy (a) and DR (b) eyes [9]

Cataracts is the most common eye disease causing vision loss and it is estimated that forty million people will lose their vision due to cataracts by 2025 [10, 11]. The lens in the eye, consisting of water, protein, and ectodermal tissue, allows the light to fall onto the retina thanks to its transparent structure and shape. The loss of the transparency of the lens due to several reasons, preventing the passage of light to the retina is called cataracts [12-14]. Cataracts, which mostly occurs due to age [15], is also caused by other diseases like diabetes, trauma, congenital factors, and smoking [13, 16]. In addition to the most common type of cataracts, nuclear cataracts, there are also cortical and posterior types. These species may be seen separately or together [12, 13]. Fundus images of cataracts patients and healthy eyes are given in Figure 2.

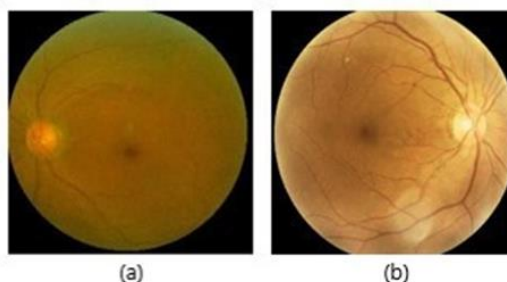


Figure 2. Fundus images of cataracts (a) and healthy (b) eyes [17]

Another important eye disorder, glaucoma is a disease that causes loss of vision because of severe damage to optical nerves. Since the disease is asymptomatic until it progresses, it is called silent vision thief [18-20]. Glaucoma is an irreversible discomfort due to the damage it causes to the OD and nerves. Although there is no cure for glaucoma, in cases of early diagnosis, its progression can be slowed down by various methods and serious consequences such as blindness can be prevented [18, 20, 21]. Figure 3 shows the fundus images of glaucoma and healthy eyes.

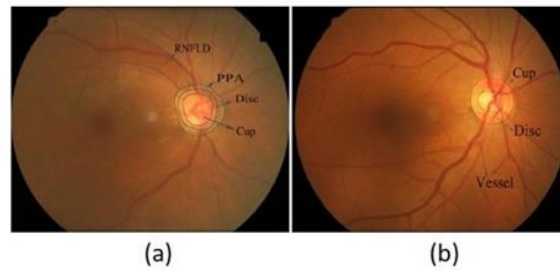


Figure 3. Fundus images of glaucoma (a) and healthy (b) [19]

Diagnosis of various eye diseases is made by ophthalmologists by inspecting the fundus images. In rural areas, number of experts is insufficient. Besides, intense workloads or lack of expertise caused ophthalmologists to make misdiagnoses. In addition, ophthalmologists with different experiences may make different diagnoses on the same fundus images. Because of these reasons, subjective results are obtained. Therefore, Computer Aided Diagnosis systems are needed for fast and accurate diagnosis. Various approaches have been used for diagnosing diseases from fundus images in the literature.

In a study conducted by B. Tymchenko et al. in 2020, a deep learning (DL) method that performs DR diagnosis on fundus images was proposed. In the proposed system created by EfficientNet-B4, EfficientNet-B5, and SE-ResNetXt50 models, several datasets are used together: EyePACs 2015 dataset, which is an open-source dataset that contains 35126 fundus images, IDRiD dataset with 413 fundus images, and Messidor dataset contains 1200 fundus images. At the end of the study, 98% accurate results were obtained [22]. In another study by S. Alrajjou et al. in 2022, it was aimed to diagnose DR by combining DL approaches. In the system using an improved PSO-NDAE-based CNN classifier, fundus images of 35126 healthy and DR patients obtained from the Kaggle database were used. According to the results of the study, it was observed the suggested system had the highest accuracy rate of 85.78% in comparison with other algorithms [23]. A DL model aimed at DR diagnosis via fundus images was proposed by A. Ayala et al. in 2021. The model was created using DenseNet121 architecture and transfer learning methodology. At the end of the study performed with the APTOS dataset with 5590 fundus images and the Messidor dataset with 1744 fundus images, it was observed that the proposed model produced 97.78% accurate results [24].

In a study performed by E. Acar et al. in 2021, cataracts diagnosis on fundus images was aimed. 548 cataracts and 5535 healthy images were selected from the dataset which contains 6392 fundus photographs in total, belonging to five thousand different patients, taken from the Kaggle Ocular Disease Recognition Database. At the end of the study that was carried out using VGGNet and DenseNet models, results with an accuracy of 97.94% were obtained [25]. In another study conducted by B. Kalyani et al. in 2023, a system for diagnosing cataracts disease was proposed using a combination of CNN and LSTM models. It was observed that the proposed system produced 98% correct results at the end of the study, which was carried out on a dataset consisting of UMN, WEB data, and data from the internet and containing a total of 4630 fundus images, including 2615 cataracts and 2015 healthy images [26]. In 2021, M. S. Junayed et al. proposed a DL network named CataractNet that aimed to diagnose cataracts through fundus images. To reduce running cost and average runtime, loss and activation functions are arranged to train the network with small kernels, fewer training layers, and parameters. According to the results of the study, which was performed using 2679 cataracts and 2067 healthy fundus images, the proposed CataractNet produced 99.13% accurate results. The obtained results showed that the proposed system is more successful than other developed cataracts detection systems [27]. In 2020, a study by F. Li et al. aimed to diagnose glaucoma with a DL approach based on ResNet101. A total of 34279 fundus images were used, of which 12618 were glaucoma, 1114 were suspicious, and 12853 were healthy, labeled by eight different glaucoma experts. Independently of this dataset, 3481 fundus images (1524 healthy, 1442 glaucoma, 515 suspected) were used to evaluate the proposed model. At the end of the study, accuracy, sensitivity, and specificity rates were observed as 95% [28].

In another study carried out by M. N. Bajwa et al. in 2019, a 2-stage system was proposed for glaucoma diagnosis. In the first stage of the proposed system, the CNN model was used, and optical disc detection was performed. In the second stage, glaucoma diagnosis was made using a deep CNN model. At the end of the study, performed on seven different datasets, namely ORIGA, HRF, OCT&CFI, DIARETDB1, DRIVE, DRIONS-DB, and Messidor, it was observed that the algorithm developed for OD detection produced better results in different datasets than its counterparts. In the diagnosis of glaucoma which was performed in the second stage of the system, it was observed that 79.67% correct results were produced [29]. In a study in 2019 by M. Kim et al. a DL system was proposed for diagnosing glaucoma using fundus images. Using the CNN and gradient-weighted class activation mapping (Grad-CAM) models results with 96% accuracy, 96% sensitivity, and 100% specificity were produced in the study, which was carried out with the Dataset-Optic-Disc dataset containing 1903 fundus images [30].

In 2019, Hongyan Zhang et al. developed an algorithm for automatically diagnosing and grading cataracts using fundus images. ResNet18 and gray-level co-occurrence matrix were used for feature extraction, while two support vector machines and a fully connected neural network were used for cataracts detection. A total of 1352 fundus images with images of various levels of cataracts were used in the study. Results of the study showed that the proposed algorithm has 92.66% accuracy for six-level grading and 94.75% for four-level grading for cataracts [31]. In another study performed in 2019, Tao Li et al. collected 13673 fundus images to evaluate DL models' performance in clinical applications for DR diagnosis. Various models were used in the study for DR grading, lesion segmentation, and lesion detection. From the results of the study, 0.83% accurate results were obtained for DR classification. On the other hand, the models used performed poorly in segmentation and detection operations [9]. Table 1 shows the summary of the literature.

Table 1. Summary of the literature

Study Author(s)	Year	Focus	Method/Model Used	Datasets Used	Accuracy
B. Tymchenko et al.	2020	DR Diagnosis	EfficientNet-B4, EfficientNet-B5, ResNetXt50	SE- EyePACs 2015, Messidor	IDriD, 98%
S. Alrajjou et al.	2022	DR Diagnosis	PSO-NDAE-based CNN	Kaggle (35,126 images)	fundus 85.78%
A. Ayala et al.	2021	DR Diagnosis	DenseNet121, Transfer Learning	APTOS, Messidor	97.78%
E. Acar et al.	2021	Diagnosis	VGGNet, DenseNet	Kaggle Ocular Disease Recognition Database	97.94%
B. Kalyani et al.	2023	Diagnosis	CNN, LSTM	UMN, WEB, Internet Data	98%
M. S. Junayed et al.	2021	Diagnosis	CataractNet	2,679 cataracts and 2,067 healthy images	99.13%
F. Li et al.	2020	Diagnosis	ResNet101	34,279 images (12,618 glaucoma, 1,114 suspicious, 12,853 healthy)	95%
M. N. Bajwa et al.	2019	Diagnosis	CNN (2-stage system for OD detection and diagnosis)	ORIGA, HRF, OCT&CFI, DIARETDB1, DRIVE, DRIONS-DB, Messidor	79.67%
M. Kim et al.	2019	Diagnosis	CNN, Grad-CAM	Dataset-Optic-Disc (1,903 fundus images)	96%
Hongyan Zhang et al.	2019	Grading	ResNet18, gray-level co-occurrence matrix, SVMs, FCNN	1,352 fundus images	92.66%-94.75%
Tao Li et al.	2019	DR Diagnosis & Grading	Various DL models for grading, segmentation, detection	13,673 fundus images	0.83%

Although reliable results are obtained from current studies in the literature, this field is still an active research topic. Considering the pros and cons of the current studies in the literature, we proposed a robust approach for detecting diseases from fundus images to evaluate the effects of the CLAHE method with models consist different blocks of varied sizes. Firstly, we used the Contrast Limited Adaptive Histogram Equality (CLAHE) method to improve histogram levels of fundus images. Then we used VGG16, MobileNet, and DenseNet169 models as classifiers. The main reason we selected these models is that the number of parameters is small, medium, and large scale. In addition, the VGG model uses stack convolution, the MobileNet model uses residual blocks and the DenseNet169 model uses densely connected blocks. Thus, different CNN models which use various blocks of varied sizes have been evaluated. The comparison in this study is based on the performance of these three models.

2. Material and Method

2.1. Dataset

There are 1038 cataracts, 1098 DR, 1007 glaucoma, and 1074 healthy fundus images in the dataset consisting of 4217 images in total. Images in the dataset were obtained from various sources such as IDRiD, Ocular recognition, and HRF [17]. For the training of DL models used, the dataset was divided into 8:1:1 ratio. 80% of data was used in training process and 10% was used for cross validation during this process. The test process was conducted with the data that was not used in the training process. The number of fundus images for each class is given in Table 2. Examples of fundus images from each class are also given in Figure 4.

Table 2. Number of fundus images

Class	Number of Fundus Images
Cataracts	1038
Diabetic Retinopathy	1098
Glaucoma	1007
Healthy	1074
Total	4217

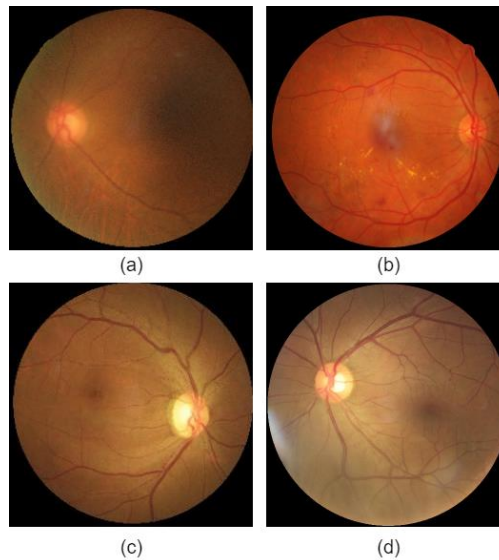


Figure 4. Cataracts (a), DR (b), Glaucoma (c) and Healthy (d) fundus images [17]

2.2. Convolutional Neural Networks

Deep learning is a type of multi-layered artificial neural network that enables computers to learn and operate on their own, similar to the human way of thinking. The concept of DL aims to enable computers to learn complex models in large datasets and to produce desired results when necessary [32, 33]. Computers have difficulties processing data when raw data is presented as input. DL eliminates this problem by dividing the data to process it in different layers [33]. DL, which has developed rapidly in recent years, owes this development to the software libraries developed, the increasing datasets, and the ease of access to these sets. Additionally, the ability to design deeper and more complex artificial neural networks with the developing technology has also contributed to the development of DL [34].

Convolutional Neural Networks (CNN) is the most widely used DL architecture. CNN has the ability to learn features on images without any feature extraction preprocess. CNN consists of three main layers: convolutional, pooling, and fully connected. The convolutional layer uses filters of varied sizes for feature extraction from images. Filter matrices are used over the images for the convolution process and to produce feature maps. The pooling layer makes the larger feature maps smaller to produce new and small feature maps while keeping the dominant features unchanged. There are some kinds of pooling methods such as tree pooling, average pooling, max pooling, global average pooling (GAP), etc. The third of the main layers of CNN is a fully connected layer. This layer is placed

as the last layer and produces the output of the system. Every neuron in the fully connected layer is connected to the previous layer [35-38]. CNN architecture is given in Figure 5.

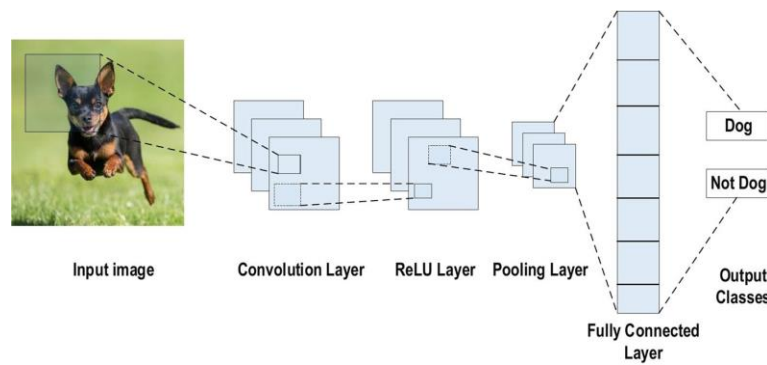


Figure 5. Image classification example with CNN architecture [35]

In this study, three different DL models were trained separately, and their performances were compared. The GAP layer was added to the last layer of the models and the Dense layer consisting of 128, 256, and 512 neurons, respectively, was added to the continuation. The first model of these models is the MobileNet model. This model was developed by Google based on deeply separable filters. MobileNet is faster and smaller in size than other models. It was developed to perform DL applications on mobile devices [39]. Another model used in the study is the VGG16 model. This model consists of a total of sixteen layers, 13 convolutional and 3 fully connected layers. VGG16 is used in image classification and object recognition applications [40]. VGG16 architecture is given in Figure 6.

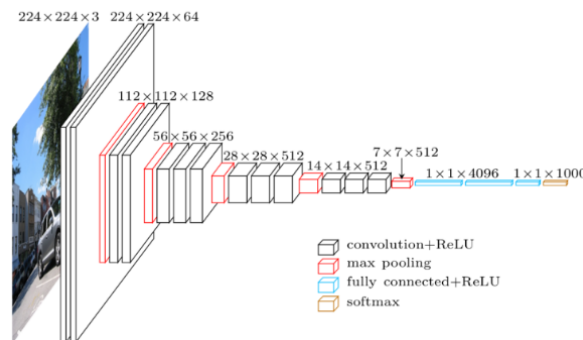


Figure 6. Architecture of VGG16 [41]

The third and last DL model used in this study is the DenseNet169 model. This model was first announced by Gao et al. in the article “Densely Connected Convolutional Networks”. Each layer of this model is connected to the previous layer and thanks to this connection, each layer can also use the information of the previous layers. In this way, the network shows better learning performance. DenseNet169 model is used for image classification, object detection, and face recognition [42]. An example of DenseNet169 architecture is given in Figure 7.

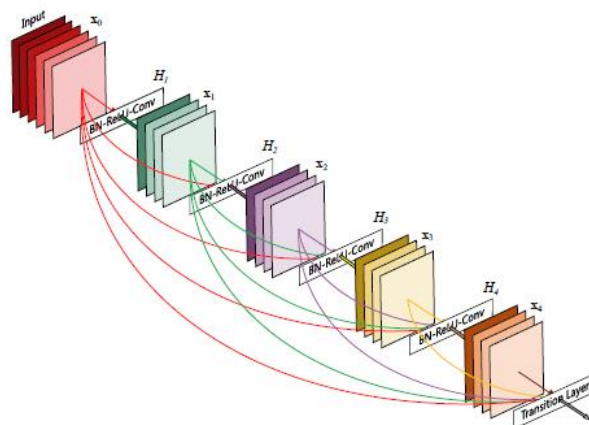


Figure 7. DenseNet169 with 5 blocks [42]

2.3. Adaptive Histogram Equalization with Contrast Limit

Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization is a histogram equalization technique used in visual analysis. It is used to improve the contrast and highlight the details in the image. Histogram equalization changes the pixel density values of an image to make it more evenly distributed in terms of contrast. However, classical histogram equalization techniques sometimes over-amplify and generate noise. CLAHE divides the image into small regions and performs separate histogram equalization in each region to fix this problem. The CLAHE technique is used in applications where details such as retinal diseases are important, especially in areas such as medical imaging. Within the scope of this study, the training process was conducted by applying the CLAHE method to all images in the dataset.

3. Experimental Setup

CNN models were trained for 50 epochs using a batch size of thirty-two and a binary cross entropy loss function. The optimization algorithm was executed for fifty iterations. The computer used in the study had 128 GB of RAM and a 3060 Ti GPU. The Python programming language was used with the Keras and Scikit-learn libraries.

3.1. Performance Metrics

In this study, the results of each model were compared using four different performance evaluation metrics: accuracy, precision, recall, and F1-score. Equations of the metrics are given in Table 3. In the equations, TP represents true positive, TN represents true negative, FP represents false positive, and FN represents false negative. The accuracy is the ratio of the correctly predicted examples to all the examples. The precision indicates ratio of positive estimations to all positive examples. The recall shows the ratio of positive estimations to real positive samples. Finally, harmonic mean of the precision and the recall is called F1-score [43].

Table 3. Performance evaluation metrics

Metric	Mathematical Expression
Accuracy	$\frac{TP + TN}{TP + TN + FN + FP}$
Precision (P)	$\frac{TP}{TP + FP}$
Recall (R)	$\frac{TP}{TP + FN}$
F1-Score	$\frac{2 \times P \times R}{P + R}$

4. Results

The results obtained from each model are arranged as tables. The accuracy, precision, recall, and F1-score values of the MobileNet model are given in Table 4. The accuracy of the MobileNet model was calculated as 92.5%.

Table 4. Performance of the MobileNet Model in Disease Classification

Class	Precision	Recall	F1-Score
Cataracts	0.917	0.943	0.930
DR	0.991	1	0.996
Glaucoma	0.880	0.863	0.871
Healthy	0.905	0.889	0.897
Weighted Average	0.924	0.925	0.925
Standard Deviation	0.041	0.052	0.039

The results and values of the VGG16 model, which is another model in the study, are given in Table 5. The results obtained have an accuracy rate of 91%.

Table 5. Performance of the VGG16 Model in Disease Classification

Class	Precision	Recall	F1-Score
Cataracts	0.949	0.886	0.916
DR	1	1	1
Glaucoma	0.793	0.902	0.844
Healthy	0.911	0.852	0.880
Weighted Average	0.915	0.911	0.912
Standard Deviation	0.092	0.055	0.058

Finally, the results and values of the DenseNet169 model are given in Table 6. The results of this model are 91.7% accurate.

Table 6. Performance of the DenseNet169 Model in Disease Classification

Class	Precision	Recall	F1-Score
Cataracts	0.917	0.943	0.930
DR	1	0.991	0.995
Glaucoma	0.952	0.784	0.860
Healthy	0.823	0.944	0.879
Weighted Average	0.923	0.918	0.917
Standard Deviation	0.065	0.078	0.052

The results of the study showed that the precision, recall, and F1-score values for cataracts diagnosis were 91.7%, 94.3%, and 93% for MobileNet, 94.9%, 88.6%, and 91.6% for VGG16 model, and 91.7%, 94.3%, and 93% for DenseNet169 model, respectively. These values showed that the DenseNet169 and MobileNet models were more successful than the VGG16 model in diagnosing cataracts.

When the performances of the models in DR diagnosis were examined, precision, recall, and F1-score values of the MobileNet model were measured as 99.1%, 100%, and 99.6%, respectively. The VGG16 model's values were measured as 100% for all three metrics. The DenseNet169 model had values of 100%, 99.1%, and 99.5%, respectively. The results showed that the VGG16 model was more successful than the MobileNet and DenseNet169 models in diagnosing DR.

The accuracy, recall, and F1-score values for glaucoma diagnosis were 88%, 86.3%, and 87.1% for the MobileNet model, 79.3%, 90.2%, and 84.4% for the VGG16 model, and 95.2%, 78.4%, and 86% for the DenseNet169 model, respectively. According to these values, it can be said that the MobileNet model may be a better choice for diagnosis of glaucoma.

Finally, the performances of the models in classifying healthy fundus images were examined. According to the results, the precision, recall, and F1-score values of the MobileNet model were measured as 90.5%, 88.9%, and 89.7%, the values of the VGG16 model were measured as 91.1%, 85.2%, and 88% and the values of the DenseNet169 model were measured as 82.3%, 94.4%, and 87.9%, respectively. These values indicated that the MobileNet model was more performant than the other models when it comes to classifying healthy fundus images.

5. Discussion

The confusion matrices, accuracy graphs, and loss graphs of the specified models are given in Figures 8-13. When Figure 8 is examined, it is seen that 9 data in total belonging to the healthy class were predicted to be glaucoma by the MobileNet model. When it comes to the VGG16 model, in Figure 10, out of a total of 14 data from the healthy class, 14 were predicted to be in the glaucoma class. Finally, in Figure 12, it is seen that 16 of the glaucoma images were predicted as healthy. These three common eye diseases are often confused with each other in terms of symptoms, each one has vision blur or loss, risk factors such as age, diabetes, or genetics, and being asymptomatic until the progress.

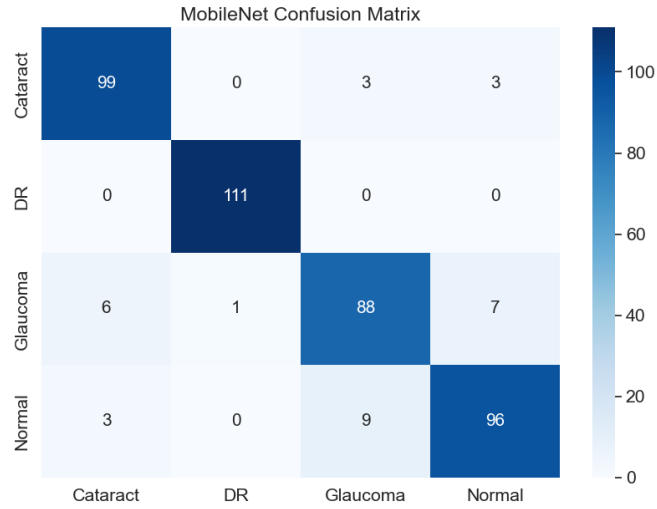


Figure 8. Confusion matrix derived from the classification of diseases with the MobileNet

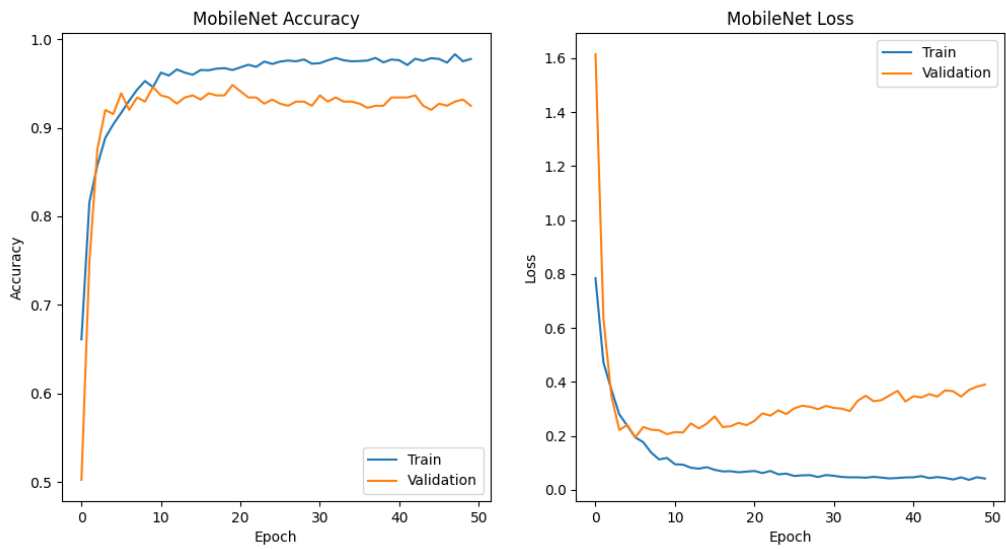


Figure 9. Accuracy and loss graphs of the MobileNet

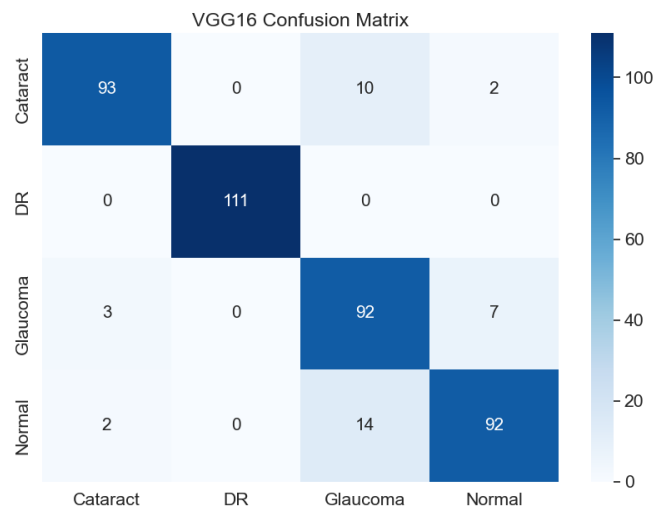


Figure 10. Confusion matrix derived from the classification of diseases with the VGG16

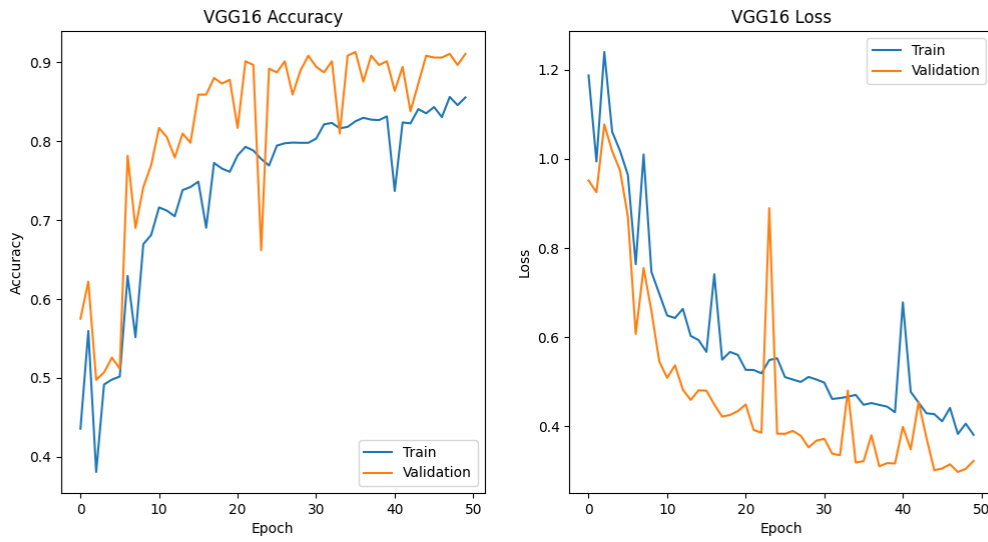


Figure 11. Accuracy and loss graphs of the VGG16

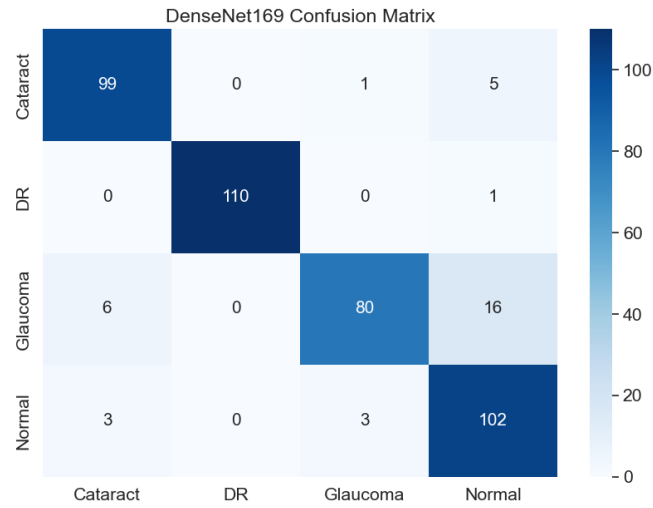


Figure 12. Confusion matrix derived from the classification of diseases with the DenseNet169

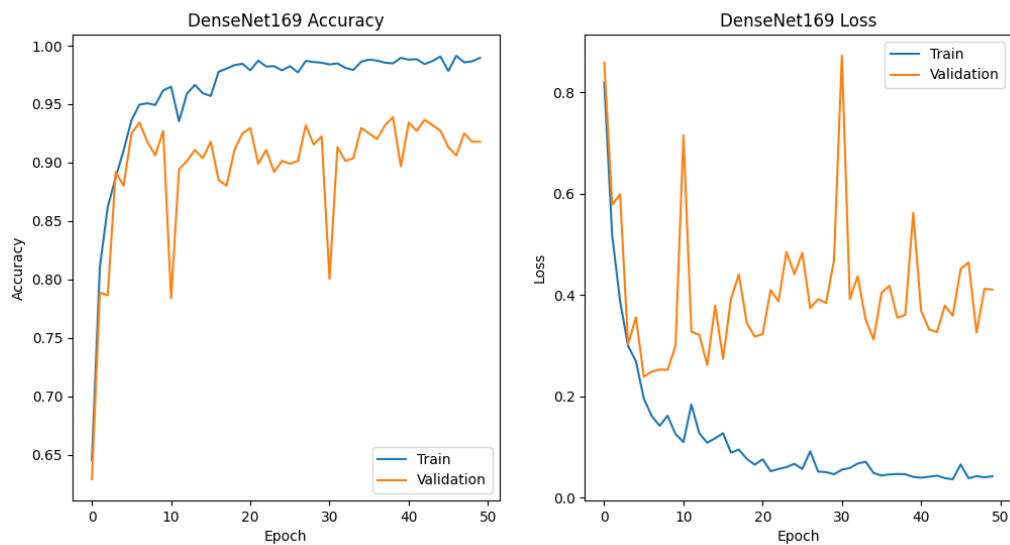


Figure 13. Accuracy and loss graphs of the DenseNet169

Results obtained in this study and literature are given in Table 7. When the values in the table are inspected, the results of this study are better than some other studies in the literature. T. Li et al used various models for DR detection and obtained an accuracy value of 82.84% while S. Alrajjou et al obtained results with an accuracy of 85.78%. The accuracy rates for the four classes obtained from this study is 92.5% with the MobileNet, 91% with the VGG16 and 91.7% with the DenseNet169. In another study carried out by M. N. Bajwa et al, accuracy rates up to 79.67% were obtained for glaucoma diagnosis while we obtained higher accuracy values. When it comes to the studies performed with the same dataset used in this study, D. Jose et al obtained a maximum accuracy value of 87.3% while B. Şener and E. Sümer achieved accuracy rates of 98.47%, 85.85%, and 80.7% with EfficientNetB0, VGG16, and VGG19 models, respectively. Our VGG16 model has an average accuracy rate of 91% outperforming their VGG16 model. This difference may result from using the CLAHE method.

Table 7. Performance comparison with other studies in literature

Reference	Year	Authors	Models	Dataset	Results
[9]	2019	T. Li et al.	VGG16, ResNet-18, GoogLeNet, DenseNet-121, SE-BN Inception	A new dataset consisting of 13673 fundus images of various levels of DR	82.84% accuracy for DR detection
[23]	2022	S. Alrajjou et al.	J48, KNN, Random Forest, Enhanced CNN	Kaggle dataset including a total of 10024 fundus images belonging to healthy and four different grades of DR	Proposed enhanced CNN has achieved an accuracy rate of 85.78% for DR detection
[29]	2019	M. N. Bajwa et al.	CNN with random training and cross validation	ORIGA, HRF, OCT & CFI, DIARETDB1, DRIVE, DRIONS-DB, Messidor	79.67% accuracy with random training and 79.39% with cross validation for glaucoma diagnosis
[44]	2023	D. Jose et al.	LeNet, DenseNet and ManualNet	A total of 4217 fundus images belonging Cataracts, DR, Glaucoma and Healthy classes	87.3% accuracy with LeNet, 59.91% accuracy with DenseNet and 80.7% accuracy with ManualNet
[45]	2023	B. Şener and E. Sümer	EfficientNetB0, VGG16 and VGG19	A total of 4217 fundus images belonging Cataracts, DR, Glaucoma and Healthy classes	Accuracy rates of 98.47% with EfficientNetB0, 85.85% with VGG16 and 92.6% with VGG19 for four different classes
	This study		MobileNet, VGG16 and DenseNet169	A total of 4217 fundus images belonging four different classes	92.5% with MobileNet, 91% with VGG16 and 91.7% with DenseNet169 for four different classes

6. Conclusion

In conclusion, this study, it was aimed to compare the performances of MobileNet, VGG16, and DenseNet169 models in classifying fundus images and to determine the best-performed model. The study was conducted with a dataset consisting of 224x224x3 pixels, and 4217 fundus images including images belonging to these four classes: glaucoma, cataracts, DR, and healthy. In the models used, the epoch and batch size values were 50 and 32, respectively. 80% of the dataset was used as training set, 10% as the test set, and the rest for cross-validation. According to the results obtained from this study, the VGG16 and MobileNet models were more performant than the DenseNet169 model by a small margin when it comes to the diagnosis of DR. The MobileNet model was more successful in classification of all four classes than the other two models. The results of the study demonstrate that using DL models such as VGG16, MobileNet, and DenseNet169 with the CLAHE method may help ophthalmologists diagnose cataracts, DR, and glaucoma with lower error rates in less time.

References

- [1] Gadekallu, T. R. and Khare, N., et al. 2020. Deep neural networks to predict diabetic retinopathy. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. (2020), 1-14.
- [2] Wong, T. Y. and Sun, J., et al. 2018. Guidelines on diabetic eye care: the international council of ophthalmology recommendations for screening, follow-up, referral, and treatment based on resource settings. *Ophthalmology*. 125 (2018), 1608-1622.
- [3] Ting, D. S. W. and Pasquale, L. R., et al. 2019. Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology. *British Journal of Ophthalmology*. 103 (2019), 167-175.
- [4] Yau, J. W. and Rogers, S. L., et al. 2012. Global prevalence and major risk factors of diabetic retinopathy. *Diabetes care*. 35 (2012), 556-564.
- [5] Tan, G. S. and Cheung, N., et al. 2017. Diabetic macular oedema. *The lancet Diabetes & endocrinology*. 5 (2017), 143-155.
- [6] Beede, E. and Baylor, E., et al. 2020. A human-centered evaluation of a deep learning system deployed in clinics for the detection of diabetic retinopathy. *Proceedings of the 2020 CHI conference on human factors in computing systems*, 1-12.
- [7] Mansour, R. F. 2018. Deep-learning-based automatic computer-aided diagnosis system for diabetic retinopathy. *Biomedical engineering letters*. 8 (2018), 41-57.
- [8] Gök, A. E., and Taşdemir, Ş. 2023. Santral Seröz Koryoretinopati Hastalığının Derin Öğrenme ile Teşhisi: Derleme Makalesi, Online, 112-122.
- [9] Li, T. and Gao, Y., et al. 2019. Diagnostic assessment of deep learning algorithms for diabetic retinopathy screening. *Information Sciences*. 501 (2019), 511-522.
- [10] Li, J. and Xu, X., et al. 2018. Automatic cataracts diagnosis by image-based interpretability. 2018 IEEE international conference on systems, man, and cybernetics (SMC), 3964-3969.
- [11] Xu, X. and Zhang, L., et al. 2019. A hybrid global-local representation CNN model for automatic cataracts grading. *IEEE journal of biomedical and health informatics*. 24 (2019), 556-567.
- [12] Asbell, P. A. and Dualan, I., et al. 2005. Age-related cataracts. *The Lancet*. 365 (2005), 599-609.
- [13] Gao, X. and Lin, S. Wong, T. Y. 2015. Automatic feature learning to grade nuclear cataracts based on deep learning. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 62 (2015), 2693-2701.
- [14] Kanski, J. J., and Bowling, B. 2011. *Clinical ophthalmology: a systematic approach*.
- [15] Luo, Y. and Chen, K., et al. 2020. Dehaze of cataractous retinal images using an unpaired generative adversarial network. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 24 (2020), 3374-3383.
- [16] Pratap, T., and Kokil, P. 2019. Computer-aided diagnosis of cataracts using deep transfer learning. *Biomedical Signal Processing and Control*. 53 (2019), 101533.
- [17] 2022. Eye Diseases Classification. Kaggle, (2022),
- [18] Chen, X. and Xu, Y., et al. 2015. Glaucoma detection based on deep convolutional neural network. 2015 37th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society (EMBC), 715-718.
- [19] Chai, Y. and Liu, H. Xu, J. 2018. Glaucoma diagnosis based on both hidden features and domain knowledge through deep learning models. *Knowledge-Based Systems*. 161 (2018), 147-156.
- [20] Schacknow, P. N., and Samples, J. R. 2010. *The glaucoma book: a practical, evidence-based approach to patient care*.
- [21] Haleem, M. S. and Han, L., et al. 2013. Automatic extraction of retinal features from colour retinal images for glaucoma diagnosis: a review. *Computerized medical imaging and graphics*. 37 (2013), 581-596.
- [22] Tymchenko, B. and Marchenko, P. Spodarets, D. 2020. Deep learning approach to diabetic retinopathy detection. *arXiv preprint arXiv:2003.02261*. (2020),
- [23] Alrajjou, S. and Boahen, E. K., et al. 2022. An enhanced interpretable deep learning approach for diabetic retinopathy detection. 2022 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC), 127-135.
- [24] Ayala, A. and Ortiz Figueroa, T., et al. 2021. Diabetic retinopathy improved detection using deep learning. *Applied Sciences*. 11 (2021), 11970.
- [25] Acar, E. and Türk, Ö., et al. 2021. Employing deep learning architectures for image-based automatic cataracts diagnosis. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 29 (2021), 2649-2662.
- [26] Kalyani, B. and Hemavathi, U., et al. 2023. Smart cataracts detection system with bidirectional LSTM. *Soft Computing*. (2023), 1-9.
- [27] Junayed, M. S. and Islam, M. B., et al. 2021. CataractNet: An automated cataracts detection system using deep learning for fundus images. *IEEE Access*. 9 (2021), 128799-128808.
- [28] Li, F. and Yan, L., et al. 2020. Deep learning-based automated detection of glaucomatous optic neuropathy on color fundus photographs. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*. 258 (2020), 851-867.

- [29] Bajwa, M. N. and Malik, M. I., et al. 2019. Two-stage framework for optic disc localization and glaucoma classification in retinal fundus images using deep learning. *BMC medical informatics and decision making*. 19 (2019), 1-16.
- [30] Kim, M. and Han, J. C., et al. 2019. Medinoid: computer-aided diagnosis and localization of glaucoma using deep learning. *Applied Sciences*. 9 (2019), 3064.
- [31] Zhang, H. and Niu, K., et al. 2019. Automatic cataracts grading methods based on deep learning. *Computer methods and programs in biomedicine*. 182 (2019), 104978.
- [32] Salvi, M. and Acharya, U. R., et al. 2021. The impact of pre-and post-image processing techniques on deep learning frameworks: A comprehensive review for digital pathology image analysis. *Computers in Biology and Medicine*. 128 (2021), 104129.
- [33] Goodfellow, I. and Bengio, Y. Courville, A. 2016. Deep learning.
- [34] Lundervold, A. S., and Lundervold, A. 2019. An overview of deep learning in medical imaging focusing on MRI. *Zeitschrift für Medizinische Physik*. 29 (2019), 102-127.
- [35] Alzubaidi, L. and Zhang, J., et al. 2021. Review of deep learning: Concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. *Journal of big Data*. 8 (2021), 1-74.
- [36] Öztürk, B., and Bilgiç, G. 2022. Yenilenebilir Enerji Tahmini İçin Derin Öğrenme Yaklaşımları. *Teknobilim-2022: Enerji Krizi ve Yenilenebilir Enerji*. (2022), 111.
- [37] LeCun, Y. and Bengio, Y. Hinton, G. 2015. Deep learning. *nature*. 521 (2015), 436-444.
- [38] Kübra, U., and Taşdemir, Ş. 2021. Detection and classification of leucocyte types in histological blood tissue images using deep learning approach. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. (2021), 130-137.
- [39] Howard, A. G. and Zhu, M., et al. 2017. Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv preprint arXiv:1704.04861*. (2017),
- [40] Simonyan, K., and Zisserman, A. 2014. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*. (2014),
- [41] Sugata, T., and Yang, C. 2017. Leaf App: Leaf recognition with deep convolutional neural networks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012004.
- [42] Huang, G. and Liu, Z., et al. 2017. Densely connected convolutional networks. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 4700-4708.
- [43] Bülbül, M.A. 2023 Optimization of artificial neural network structure and hyperparameters in hybrid model by genetic algorithm: iOS-android application for breast cancer diagnosis/prediction. *The Journal of Supercomputing*. (2023), 1-21.
- [44] Jose, D. 2023. Classification of EYE Diseases Using Multi-Model CNN. *2023 IEEE 4th Annual Flagship India Council International Subsections Conference (INDISCON)*, 1-6.
- [45] Şener, B., and Sümer, E. Classification of Eye Disease from Retinal Images Using Deep Learning.

Research Rainwater Harvesting Potential of Erciyes University Campus Based on The UI GreenMetric Ranking

Zeynep ARDA ERGEN*¹ , Barış ERGEN ² 

*¹Erciyes University, Department of Architecture, KAYSERİ

(Alınış / Received: 06.12.2023, Kabul / Accepted: 29.02.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

Keywords

Keywords 1,
Rainwater
Harvesting,
Keywords 2,
University Campus,
Keywords 3, UI
GreenMetric

Abstract: A green campus is one of the important aspects of an ecological city. Setting and infrastructure, energy and climate change, waste, water, transportation, and education are major elements of a green campus. This study focuses on water consumption and savings, which generally involves a rainwater harvesting system. Erciyes University became the third environmentally sensitive university in Turkey according to the UI GreenMetric 2020–2021 ranking. While Erciyes University was ranked 142nd in the world in 2020, with a total score of 7175, it rose to 99th place in 2021, with 7775 points. According to UI GreenMetric Erciyes University was ranked 85nd in the world in 2023. This paper investigates and describes a rainwater harvesting method for Erciyes University. The total harvestable water was calculated as the roof surface area \times the average annual rainfall \times the loss coefficient. The loss coefficient was set as 0.75 considering the differences in roof forms. The rainwater harvesting calculations were computed based on the building floor areas because of the differences in roof forms. The total harvestable water was calculated to be 64,635.432 m³ from the roofs (floor area) in the campus area of Erciyes University. Accordingly, it is possible to save approximately 7.55% of the annual water consumption, saving 1,066,477 TL and supplying water to 7,181 people per year by harvesting rainwater from the roofs at Erciyes University. It is concluded that the proposed rainwater harvesting method help Erciyes University rank higher in the UI GreenMetric ranking, contribute to the eco-city approach, and enhance campus sustainability.

Erciyes Üniversitesi Yağmur Suyu Potansiyelinin UI GreenMetric Sıralaması Bağlamında Araştırılması

Anahtar Kelimeler

Anahtar Kelime 1,
Yağmur Suyu
Hasadı,
Anahtar Kelime 2,
Universite
Kampüsü,
Anahtar Kelime 3,
UI GreenMetric

Öz: Yeşil kampüs, ekolojik şehrin önemli unsurlarından biridir. Yerleşim ve altyapı, enerji ve iklim değişikliği, atık, su, ulaşım ve eğitim yeşil bir kampüsün başlıca öğeleridir. Bu çalışma, yağmur suyu toplama sistemini içeren su tüketimi ve tasarrufuna odaklanmaktadır. Erciyes Üniversitesi, UI GreenMetric 2020-2021 sıralamasına göre Türkiye'de çevreye duyarlı üçüncü üniversite olmuştur. Erciyes Üniversitesi 2020 yılında toplam 7175 puanla dünyada 142. sırada yer alırken, 2021 yılında 7775 puanla 99. sıraya yükselmiştir. UI GreenMetric sıralamasına göre Erciyes Üniversitesi 2023 yılında dünyada 85. sırada yer almıştır. Bu makalede, Erciyes Üniversitesi için yağmur suyu hasadı yöntemi kullanılmıştır. Toplam hasat edilebilir su miktarı, çatı yüzey alanı \times yıllık ortalama yağış miktarı \times kayıp katsayısı hesabı esas alınarak hesaplanmıştır. Kayıp katsayısı, çatı formlarındaki farklılıklar göz önünde bulundurularak 0,75 olarak belirlenmiştir. Hesaplama çatı farklılıkları nedeniyle bina taban alanları esas alınmıştır. Erciyes Üniversitesi kampüs alanındaki çatılardan toplam hasat edilebilir su miktarı 64.635,432 m³ olarak hesaplanmıştır. Buna göre, Erciyes Üniversitesi'nde çatılardan yağmur suyu hasadı yapılarak yıllık su tüketiminin yaklaşık %7,55'inden tasarruf edilmesi, 1.066.477 TL tasarruf sağlanması ve yılda 7.181 kişiye su temin edilmesi mümkündür. Önerilen yağmur suyu hasadı yönteminin, Erciyes Üniversitesi'ni UI GreenMetric sıralamasında daha üst sıralara taşıyacağı, eko-kent yaklaşımına katkıda bulunacağı ve kampüs sürdürülebilirliğini geliştirmesine yardımcı olacağı sonucuna varılmıştır.

*İlgili Yazar, email: zeynepergen@erciyes.edu.tr

1. Introduction

Considering various criteria, ranking tables have been created for universities since 1983 when the annual America's Best Colleges Review was first published [1, 2]. Within the scope of this issue, many universities have been conducting studies worldwide on sustainability and green university rankings [3, 4, 5]. With the Talloires Declaration published in 1990, 40 different countries and nearly 300 universities have prioritized sustainable development in education, research, information exchange, policy-making, and practices, and accordingly, the concept of the sustainable campus has started to gain prominence [4, 6, 7]. Consequently, sustainable campuses have become a global area of interest for planners and university administrations [6]. Starting in the 2000s, and especially after 2010, the concepts of green universities and green campuses have gained attention as a part of environmental sustainability, not only in scientific research but also in campus infrastructure and environmentally friendly practices [3]. Created in 2010 at Universitas Indonesia, UI GreenMetric is one of the university rankings used to measure green campus practices on a global scale and evaluate the efforts of universities for sustainability [3, 4, 5, 8]. UI GreenMetric helps clarify multiple definitions of green campuses and is used to evaluate the sustainability efforts of university campuses [1, 9]. Specifically, the UI GreenMetric rating addresses universities' practices and performances in six categories: infrastructure, energy and climate change, waste, water, transport, and education and research [10].

This study examined the rainwater harvesting potential at Erciyes University, categorized under the water heading of the UI GreenMetric sustainable campus performance.

1. 1. Erciyes University: UI GreenMetric

Erciyes University is located in the city of Kayseri. Figure 1 depicts the location of Kayseri province in Turkey, as well as the city and Erciyes University. Erciyes University is one of the 10 research universities established in Turkey in 2017 [11]. Today, there are 20 research universities in Turkey, and Erciyes University ranks 8th among them [12]. Erciyes University has a total of 49,721 students, and among them, 2,377 are associate degree students, 38,011 are undergraduates, 6,935 are graduates, and 2,398 are doctoral students in 2021-2022 academic year. In addition, 2,218 academics work at the university [13].

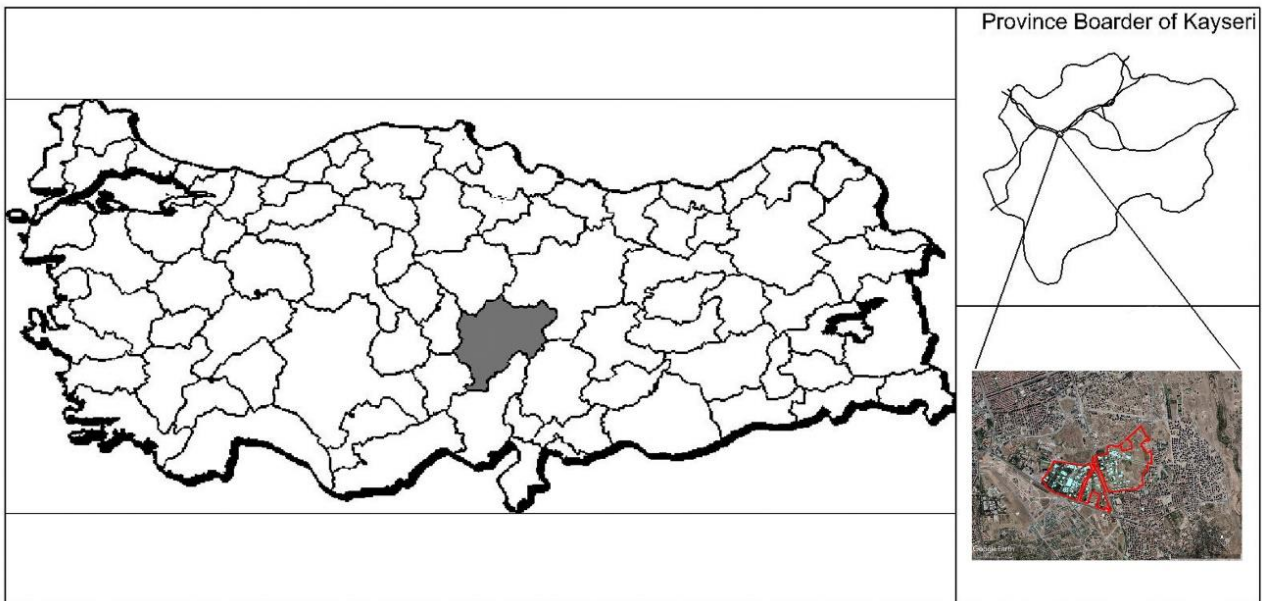


Figure 1. Location of Kayseri in Türkiye

Figure 2 shows the central campus of Erciyes University, where the buildings shown in blue are used in the rainwater harvesting calculation. In this study, the buildings under construction were not considered. The total floor area of the buildings used in the study is 219,289 m². The implementation-zoning plan was based on determining the campus area boundary. According to the implementation-zoning plan, the total area of the university is 3,092,585.274 m² (309.26 hectares). Erciyes University's 2019 sustainability report states that 39% of the total area is covered with vegetation [14]. Erciyes University's 2021 Sustainability report states that the proportion of cultivated areas in the total area is 24.38% [14]. The university not only provides green space for students with its campus area but also for the city of Kayseri.



Figure 2. Erciyes University campus boundary and the buildings considered in this study

Figure 3 shows implementation-zoning plan around Erciyes University campus. When the implementation-zoning plan is examined to understand the urban development around the Erciyes University campus, it is seen that the city of Kayseri and the Erciyes University campus are integrated with linear green spaces. In this case, the Erciyes University campus area contributes to the urban ecosystem and offers green spaces that integrate with other green spaces in the city, contributing significantly to the overall urban sustainability. According to the implementation-zoning plan, the built environment around the Erciyes University campus area will intensify in the future. The Erciyes University campus has a high green space potential within the city because of its low building density and valuable open space where water can be collected through rain harvesting.

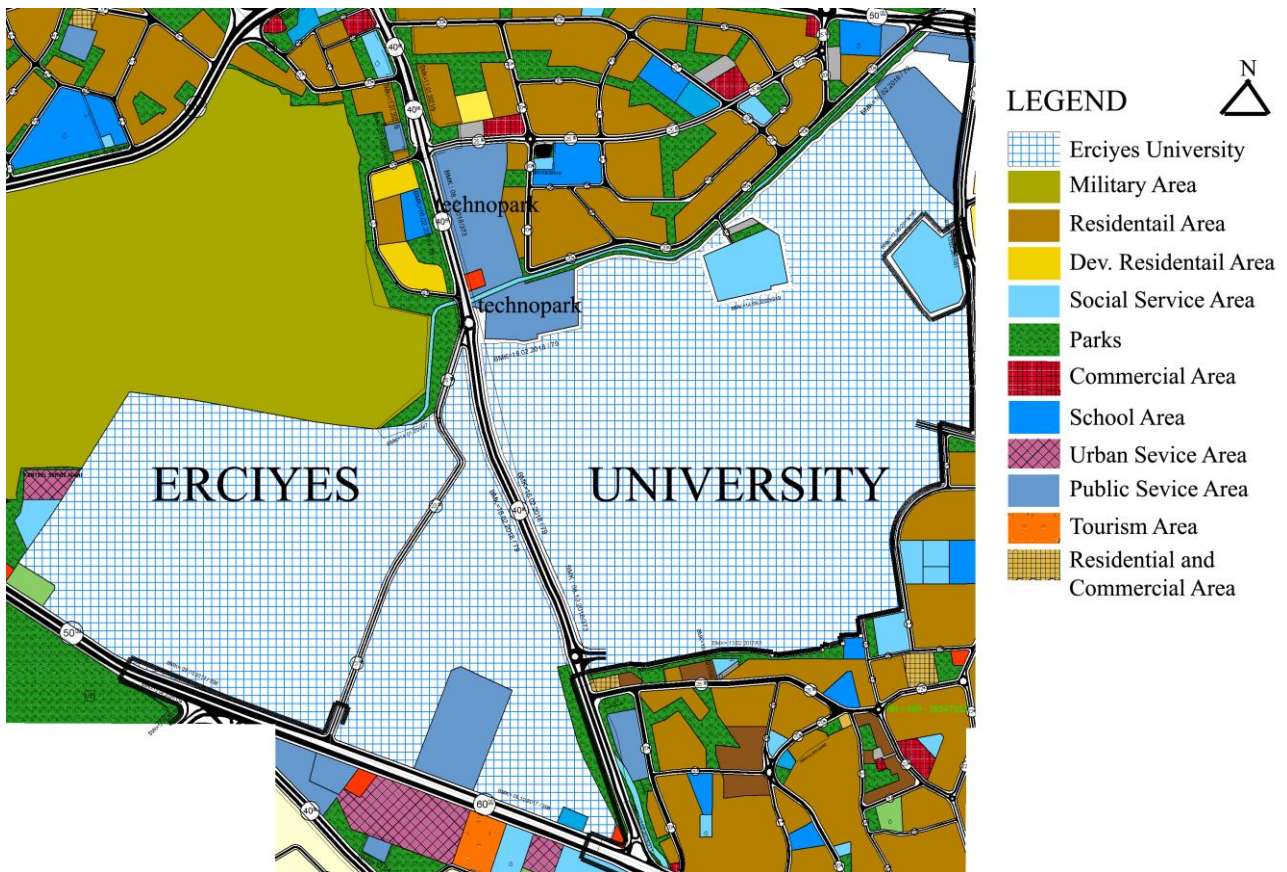


Figure 3. Implementation-zoning plan around Erciyes University campus

Water is stored in an artificial pond at Erciyes University, and the needs of plants are met using water from this pond during dry periods. In addition, rainwater harvesting is conducted over an area of 71,000 m² at the Erciyes University Technopark [15]. Examining the UI GreenMetric studies of Erciyes University, important steps have been taken to attain the goal of campus sustainability. Table 1 shows the performance of Erciyes University in the 2017–2023 annual rankings of UI GreenMetric. There was a decrease in the water score in 2018; however, a 3-fold increase occurred in 2019 compared with 2018. In 2020, the same performance was observed as that in 2019. Although there was an increase of 50 points in 2021, the same score was received in 2022 as that in 2021. In 2023, the total score increased; however, the impact of water remained stable over the last three years. Notably, the water criterion has the lowest score among the sustainability criteria in the performance table of Erciyes University.

Table 1 Erciyes University UI GreenMetric Performance (2017–2023)

Year	Setting and Infrastructure	Energy and Climate Change	Waste	Water	Transportation	Education	Total Score
2023	13.50	16.10	14.25	8.00	16.00	16.75	84.60
2022	13.25	15.35	14.25	8.00	16.00	15.75	82.60
2021	12.25	14.00	13.50	8.00	14.25	15.75	77.75
2020	11.00	12.50	12.00	7.50	13.75	15.00	71.75
2019	11.00	12.00	9.00	7.50	11.75	14.25	65.50
2018	12.50	10.75	6.00	2.50	9.50	12.50	53.75
2017	9.50	8.77	5.73	4.41	9.13	7.56	45.10

Source: [16]

Table 2 shows Erciyes University’s performance based on the proportions of their scores in Setting and Infrastructure, Energy and Climate Change, Waste, Water, Transportation, and Education from the UI GreenMetric criteria between 2017 and 2023. Considering the change in the percentage ratios of the performance data over the years, there has been a gradual increase in the waste heading, and the largest decrease was experienced in the

performance of Setting and Infrastructure. When the change is analyzed in terms of percentages, there is a 0.23% decrease in the water in 2023 compared with the previous year. There has been a decrease in the water topic in terms of percentage change over the last four years.

Table 2 Percentage Changes of UI GreenMetric Criteria (2017–2023)

Year	Setting and Infrastructure	Energy and Climate Change	Waste	Water	Transportation	Education	Total Score
2023	15.96	19,03	16.84	9.46	18,91	19,8	100.00
2022	16.04	18.58	17.25	9.69	19.37	19.07	100.00
2021	15.76	18.01	17.36	10.29	18.33	20.26	100.00
2020	15.33	17.42	16.72	10.45	19.16	20.91	100.00
2019	16.79	18.32	13.74	11.45	17.94	21.76	100.00
2018	23.26	20.00	11.16	4.65	17.67	23.26	100.00
2017	21.06	19.45	12.71	9.78	20.24	16.76	100.00

Source: [17]

As seen in Table 2, Erciyes University received the lowest score for the water criterion. For this reason, the water score requires attention and should be strengthened.

Table 3 shows the annual water consumption of Erciyes University. Accordingly, 975,320 m³ of water was consumed in 2018, 963,500 m³ in 2019, and 790,329 m³ in 2020. The decrease in the amount of water used in 2020 was due to the COVID-19 measures that included first stopping education for three weeks, then completing that semester by switching to distance education and providing 40% of education through distance education in September in 2020. Looking at the amount of water consumed in 2021 and 2022, there was a positive change in water savings after 2020. Approximately 855,282 m³ of average water is consumed annually at Erciyes University.

Table 3 Amount of water used at Erciyes University (2018–2021)

Years	Amount of water (m ³)
2018	975,320
2019	963,500
2020	790,329
2021	754,900
2022	792,362

Sources: [18, 19]

Overall, it is clear that the annual water consumption of Erciyes University is considerably high. In this context, water harvesting is necessary to support the efficient use of water resources and contribute to the campus's sustainability.

1. 2. Kayseri and Precipitation

According to the climate data obtained from the Turkey General Directorate of Meteorological Affairs for the years 1970–2013, the average precipitation in Kayseri city center was 393 mm, and the average number of rainy days was 109.6 (Kayseri Province Clean Air Action Plan Report). Table 4 shows the monthly average rainfall and number of rainy days. Precipitation is typically the highest in April and May. In addition, the driest month is August, although July, August, and September are also relatively dry.

Table 4 Monthly Distribution of Precipitation and Average Number of Rainy Days in Kayseri City Center (1970–2013)

	Average amount of precipitation (mm)	Average number of rain days
January	33.1	12
February	33.1	11
March	42.2	12

April	55.9	138
May	54.3	135
June	38.6	8
July	11.4	2
August	5.8	18
September	11.3	37
October	33.3	8
November	35.5	9
December	38.5	118

Source: [20]

Thornthwaite developed a method to calculate the evapotranspiration potential based on the relationship between temperature, average precipitation, and humidity [21, 22, 23]. Figure 4 shows the climate characteristics in Turkey according to Thornthwaite's climate classification. According to this classification, Kayseri has a semi-arid to less humid climate where high levels of evaporation may occur, implying that water resources are generally insufficient, increasing the importance of supplemental methods such as rainwater harvesting.

Thornthwaite İklim Sınıflandırma Yöntemine Göre Türkiye İklimi Türkiye's Climate According to Thornthwaite Climate Classification

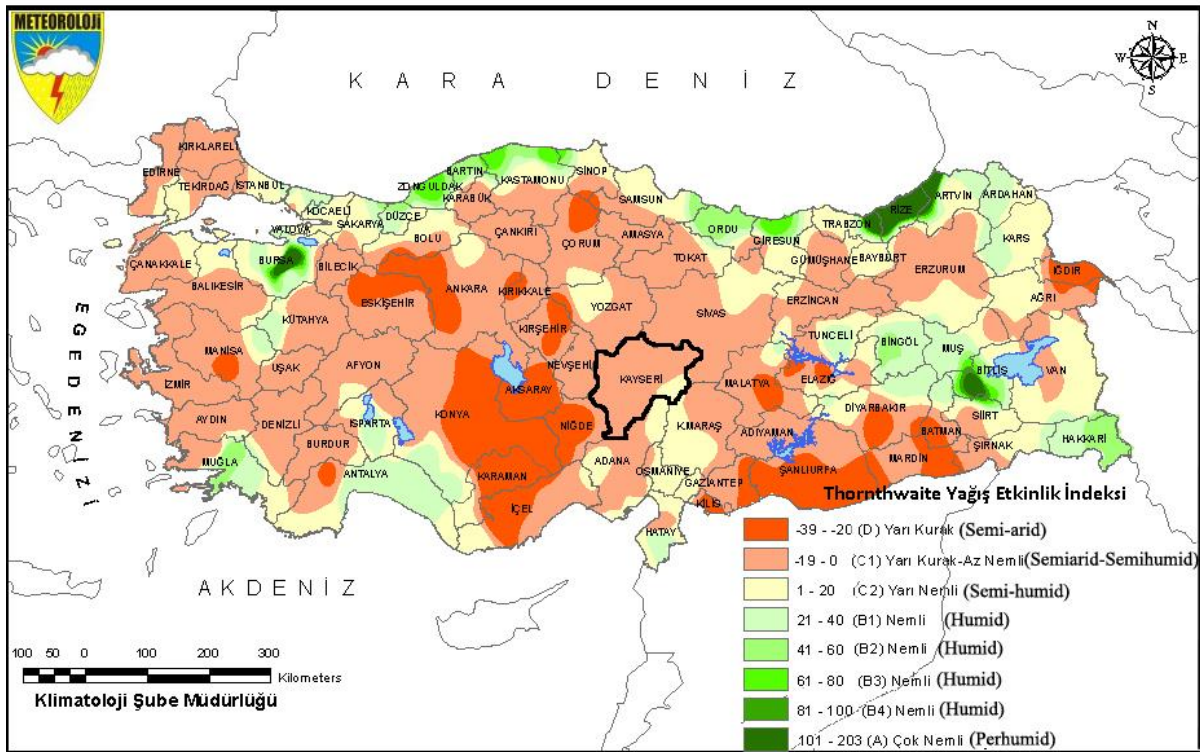


Figure 4. The climate in Kayseri according to Thornthwaite's climate classification, Source: [24]

In an analysis using the Mann-Kendall method and considering annual average precipitation, the average annual precipitation increased slightly between 1960 and 2005, but the change was not significant [25]. Ünlükara et al. investigated drought considering annual precipitation changes between 1975 and 2010 and reported that mostly mild droughts occurred in Kayseri, although severe and moderate droughts also occurred between these years [26]. The limits of water resources were taxed during periods of sudden precipitation changes and drought in Kayseri [25]. Figure 5 displays a map depicting the average annual precipitation in Turkey, showing that Kayseri city center receives less than 400 mm of precipitation.

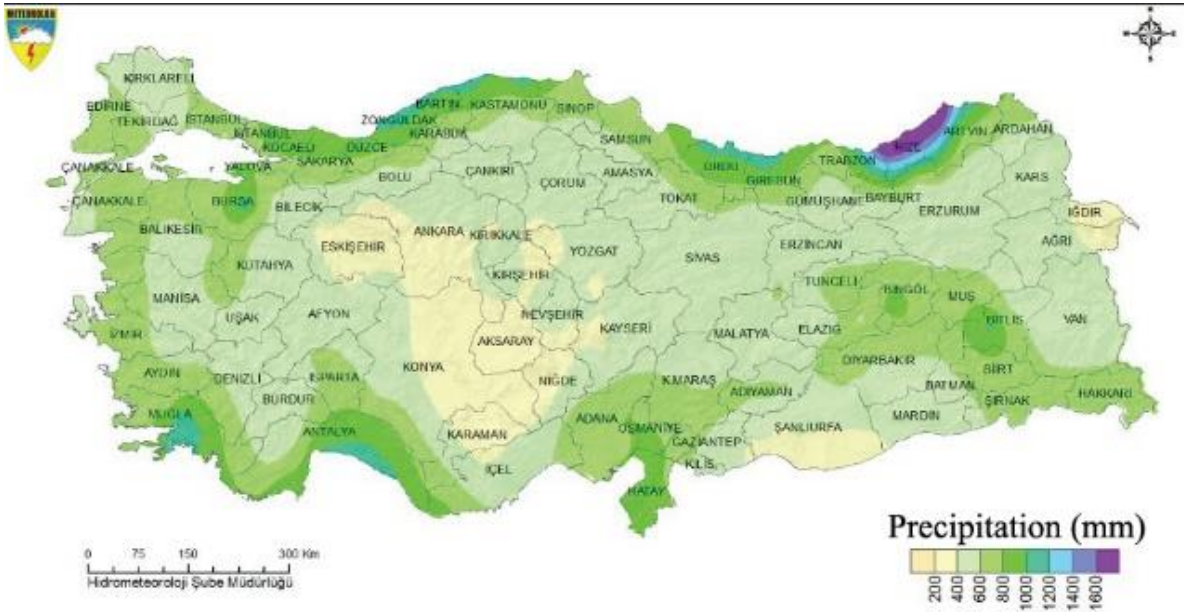


Figure 5. Average annual precipitation in Turkey (1981-2010), Source: [27]

Owing to the semi-arid climate and precipitation of less than 400 mm, it is important to use rainwater efficiently in Kayseri. Regardless, water should be prioritized in sustainable practices and green campus design.

2. Material and Method

Rainwater harvesting is the process of collecting and storing rainwater for later use [28, 29]. Rainwater collected by rainwater harvesting can be recharged to the groundwater [30] or collected in man-made tanks [31]. Rainwater harvesting is predominantly and most commonly harvested from roofs but can also be collected from impermeable surfaces where rainwater often accumulates, such as roads and rock surfaces. Rainwater harvesting is a simple and inexpensive but effective method for obtaining usable water considering diminishing water resources [29, 32, 33]. Rainwater harvesting involves the collection of rainwater from the catchment surface through pipes, which is stored in natural ponds or artificial tanks, and typically filtered [29, 32, 33, 34]. Rainwater harvesting is effective in reducing the use of municipal water, reducing water costs for users, protecting the soil from erosion by reducing the risk of flooding. Additionally, recharging/replenishing the water collected using this method to groundwater and aquifers helps to protect existing water sources [33, 34].

In recent years, rainwater harvesting has become increasingly important in sustainable campus practices and has been discussed in scientific research [35, 36, 37, 38].

Rainwater harvesting is recognized as one of the most effective methods for creating water resources [31] and promises to make a significant contribution to addressing water scarcity in the future [28]. It is not possible to use the water obtained from rainwater harvesting directly as drinking water because it contains microbial pathogens, waste from urban dwellers, traffic emissions, and industrial pollutants. Thus, chemical or biological treatment is needed before using it as drinking water [39].

Collecting water through rainwater harvesting is theoretically directly proportional to the amount of rainfall and the water collection surface area. However, the storage tank capacity is also very important because it is not possible to store the precipitation that continues to fall after the water tank is full. In addition, the intensity of the rainfall and wind during precipitation, the rate of evaporation, and the structure of the collection surface are among the factors affecting storage [29, 39]. In this study, it was assumed that rainwater was harvested from all buildings on the Erciyes University campus and that rainwater can be collected effectively from all surfaces and all rainwater can be stored.

Rainwater harvesting potential (P_w), catchment area (total roof area) (A), runoff coefficient (C), and rainfall (R) values were used in the calculation.

P_w = Potential of rainwater harvesting (m^3)

A = Area of catchment (total roof area) (m^2)

C = Runoff coefficient

R = Amount of Rainfall (mm)

The runoff coefficient can be defined as the ratio of rainwater drained during rainfall to the total surface runoff [40, 41]. The occurrence and volume of the runoff are affected by rainfall characteristics such as intensity, duration [42, 43], catchment material [44], distribution, and some physical characteristics of watersheds [40]. The runoff coefficient for rain collection from roofs varies depending on factors such as the roof form, materials, rainfall intensity, and wind speed; however, it is generally accepted to be in the range of 0.75–0.95 [45, 46]. A minimum value (0.75) was used herein because of the differences in roof forms among the campus buildings.

The water collection area is defined as the area where rain falls and water is collected. In this study, the water collection area was determined by the roof surfaces. Roof form, surface material, and slope are important factors in rain harvesting. Owing to the variation in roof forms and the difficulties in calculating roof surface area, the rainwater harvesting calculations were computed based on the building floor areas.

Rainfall is based on the average annual rainfall amount. Monthly rainfall data are necessary to calculate how much water can be collected during the wet and dry seasons, which helps to determine the appropriate storage volume. In this study, these values were considered, and the following formula was applied [28, 29, 30, 47].

$$P_w = A \times C \times R$$

The total floor area of all buildings in Erciyes University is 219,289 m². According to the meteorological station data in Kayseri city center where Erciyes University is located, the average annual rainfall is 393 mm. Considering the differences in roof surface material and roof form, the runoff coefficient was assumed to be 0.75, as shown below.

$$219,289 \times 393 \times 0.75 = 64,635.432 \text{ m}^3$$

As a result, the amount of water savings that can be obtained only using all the roof surfaces is 64,635.432 m³ if all the rainwater is harvested.

The months of July, August, and September coincide with the academic holiday period. For this reason, it is important to calculate the rainwater harvesting potential on a monthly basis in terms of water collected by rainwater harvesting and water consumption. An examination of Table 5 indicates that there is not enough rainfall in July, August and September, and the average precipitation is low, so it is necessary to use water economically.

Table 5 The average monthly roof water harvesting potential of Erciyes University

	Average amount of precipitation (mm)	Roof surface (m ²)	Runoff coefficient	Monthly rainwater harvesting potential (m ³)
January	33.1	219,289	0.75	544,385
February	33.1	219,289	0.75	544,385
March	42.2	219,289	0.75	694,050
April	55.9	219,289	0.75	919,369
May	54.3	219,289	0.75	893,054
June	38.6	219,289	0.75	634,842
July	11.4	219,289	0.75	187,492
August	5.8	219,289	0.75	95,391
September	11.3	219,289	0.75	185,847
October	33.3	219,289	0.75	547,674
November	35.5	219,289	0.75	583,857
December	38.5	219,289	0.75	633,197

3. Results

Under the heading of water, UI GreenMetric gives scores based on the water savings program and implementation (WR 1), implementation of water recycling program (WR 2), water-saving device usage (WR 3), consumption of treated water (WR 4), and water pollution control in the campus area (WR 5). If rainwater is harvested from the roof surfaces of all buildings on the campus and the harvested rainwater is treated and recycled as domestic water, full scores can be obtained for WR1, WR 2, WR 4, and WR 5. In addition, the water obtained by rainwater harvesting can be used for irrigation of the existing cultivated vegetation in the campus area, and the use of rainwater harvested in afforested areas can help increase the total area covered with forest vegetation on the campus. The use of harvested water for irrigation in cultivated and vegetation areas can also help Erciyes University rank higher in the UI GreenMetric ranking.

The average monthly water consumption of a student in vocational schools and higher education institutions on the Warsaw University campus is 0.8 m^3 per month in departments with laboratories and 0.45 m^3 per month in departments without laboratories [48]. Assuming that there is an equal number of students in the departments with and without laboratories, the average monthly water consumption of a person in the campus area can be considered as 0.625 m^3 . According to this calculation, the average annual water consumption of a student is 7.5 m^3 . Another study reports that the daily water consumption per person at Al-Quds University is 25 liters [49]. Considering this study, the total annual water consumption of a person is approximately 9.125 m^3 . Thus, the water consumption of a person on campus varies between 7.5 and 9 m^3 . When the amount of water consumption per person in campus areas is considered as 9 m^3 , which is the highest value in the literature, it is possible to meet the annual water needs of approximately 7,181 people using the rainwater harvested from the roof surfaces at Erciyes University. There are 49,721 students studying at Erciyes University, as well as 2,218 academics and approximately 4,000 administrative staff. It is possible to meet the annual water use needs of 7,181 of the 56,000 people, meeting the water consumption of approximately 13% of the total university population. In terms of economic evaluation, the unit price per m^3 of water in Kayseri was 16.5 TRY as of July 2023. If rainwater is harvested from all roof surfaces at Erciyes University and the water obtained by harvesting is used as domestic water on the campus, it is possible to save approximately 1,066,477 ₺ (US \$ 39,527 according to dollar exchange rate in July 2023) per year.

4. Discussion

University campuses resemble small cities owing to their large size, the substantial number of students and teaching staff, and the accommodation of different activities [6, 50, 51, 52]. As an important element of cities, the sustainability of campus areas significantly contributes to urban sustainability. Furthermore, campuses are important elements of the urban ecosystem. They add positive value to the urban ecosystem with their environment, particularly their open areas and green spaces. Similarly, Erciyes University has the potential to significantly contribute to the urban ecosystem with its open areas, vegetation, and green spaces suitable for various environmental interactions.

Nature-friendly, ecological designs and studies to be carried out in universities will be role models for ecological and nature-friendly designs and applications that will be conducted in other areas of the city and thus contribute to the protection of the environment.

The importance of water management is increasing, especially today when the effects of global climate change are felt. At Erciyes University, it is possible to collect approximately $64,635.432 \text{ m}^3$ of water annually through rainwater harvesting. The average annual water consumption of Erciyes University is approximately $855,282 \text{ m}^3$. Considering that a large amount of the water is used for irrigation of the green area in the dry period, along with the gray water system, it is possible to save a significant amount of water by simply catching rainwater. Considering that Erciyes University achieved its score from water criterion in the IU GreenMetric ranking due to its water saving in 2019, rainwater harvesting will make a significant contribution to the university's goal of becoming a sustainable campus.

5. Conclusion

The sustainability of campus areas is gaining more importance day by day in the world. The IU GreenMetric ranking is a valuable approach in the assessment of a sustainable campus. Erciyes University has taken major steps, such as installing a gray water treatment facility, adding water sensors in restrooms, and using drip irrigation systems for plants, to achieve a sustainable campus area. Moreover, water management is becoming increasingly important considering the changing climate conditions, and Kayseri has a semi-arid and less humid climate, which may suffer from droughts more in the coming years. From the potential $64,635.432 \text{ m}^3$ of rainwater harvested annually, the university can reduce 7.55% of its annual water consumption. This can considerably enhance the campus and urban sustainability, ultimately increasing their IU GreenMetric score. The effects of global warming have been felt more and more in years. One of the most important problems that can emerge in provinces in semi-arid climates like Kayseri is water scarcity. Considering this issue, it is clear that every step toward rainwater harvesting can actually contribute to the sustainability of the Kayseri University campus and thus to urban sustainability.

References

- [1] Lauder, A., Sari, F. R., Suwartha, N., Tjahjono, G. 2015. Critical review of a global campus sustainability ranking: GreenMetric. *Journal of Cleaner Production*, 108 (A), 852-863.
- [2] Lukman, R., Krajnc, D., Glavič, P. 2010. University ranking using research, educational and environmental indicators. *Journal of Cleaner Production*, 18 (7), 619-628.
- [3] Atici, K. Z., Yasayacak, G., Yildiz, Y., Ulucan, A. 2021. Green University and academic performance: An empirical study on UI GreenMetric and World University Rankings. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125289.
- [4] Tan, H., Chen, S., Shi, Q., Wang, L. 2014. Development of green campus in China. *Journal of Cleaner Production*, 64, 646-653.
- [5] Suwartha, N., Sari, F.R. 2013. Evaluating UI GreenMetric as a tool to support green universities development: assessment of the year 2011 ranking. *Journal of Cleaner Production*, 61, 46-53.
- [6] Alshuwaikhat, H. M., Abubakar, I. 2008. An integrated approach to achieving campus sustainability: assessment of the current campus environmental management practices. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1777-1785.
- [7] Haigh, M. 2005. Greening the University Curriculum: Appraising an International Movement. *Journal of Geography in Higher Education*, 29 (1), 31-48.
- [8] Marrone, P., Orsini, F., Asdrubali, F., Guattari, C. 2018. Environmental performance of universities: Proposal for implementing campus urban morphology as an evaluation parameter in Green Metric. *Sustainable Cities and Society*, 42, 226-239.
- [9] Safarkhani, M., Örnek, M.A. 2022. The meaning of green campus in UI GreenMetric World University Rankings perspective. *ITU A|Z*, 19 (2), 315-334.
- [10] Ali, E.B., Anufriev, V. P. 2020. UI GreenMetric and Campus Sustainability: A Review of the Role of African Universities. *Int. J. of Energy Prod. & Mgmt*, 5 (1), 1-13.
- [11] Mammadov, R., Aypay, A. 2020. Efficiency analysis of research universities in Turkey. *International Journal of Educational Development*, 75, 102176.
- [12] Research Universities in Türkiye. 2023. Council of Higher Education, Ankara. <https://www.yok.gov.tr/Sayfalar/Universiteler/arastirma-universiteleri.aspx> (accessed, 05.05.2023)
- [13] Yükseköğretim Bilgi Yönetim Sistemi. 2023. <https://istatistik.yok.gov.tr/> (accessed 09.12.2022)
- [14] Erciyes University Sustainability Report. 2019. <https://yesilkampus.erciyes.edu.tr/icerikdosyolari/file/SURDURULEBILIRLIK-RAPORU.pdf> (accessed 05.05.2023)
- [15] Erciyes University 2021 sustainability report <https://yesilkampus.erciyes.edu.tr/icerikdosyolari/%C3%87evresel%20S%C3%BCrd%C3%BCr%C3%BClebilirlik%20raporu%202021.pdf>
- [16] Temiz Su ve Sanitasyon İlerlemeleri. 2021. <https://sustainability.erciyes.edu.tr/Dosya/MainContent/50ac00c3-a411-4524-9a02-6cd02d2bbf97.pdf> (accessed, 13.05.2023)
- [17] UI GreenMetric. 2023. <https://greenmetric.ui.ac.id/rankings/archive> (accessed, 26.05.2023)
- [18] UI GreenMetric. 2023. <https://greenmetric.ui.ac.id/> (accessed, 26.05.2023)
- [19] Temiz Su ve Sanitasyon İlerlemeleri 2020. <https://www.erciyes.edu.tr/EditorUpload/Files/076ad686-3b61-437b-b5e7-7895d068f768.pdf> (accessed, 05.05.2023)
- [20] Temiz Su ve Sanitasyon İlerlemeleri. 2022. <https://sustainability.erciyes.edu.tr/Dosya/MainContent/5227432b-c892-44c2-9faa-f9657f3740c1.pdf> (accessed, 05.05.2023)
- [21] THEP. 2014. Kayseri İli Temiz Hava Eylem Plan Raporu (Kayseri Province Clean Air Action Plan Report), Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Kayseri İl Çevre ve Şehircilik Müdürlüğü, Kayseri. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/kayseri/icerikler/hava-kalitesi--8230-56709-20211130141206.pdf> (accessed, 13.05.2023)
- [22] Kumar, K. K., Rupa-Kumar, K., Rakhecha, P. R. 1987. Comparison of Penman and Thornthwaite Methods of Estimating Potential Evapotranspiration for Indian Conditions. *Theor. Appl. Climatol.* 38, 140-146.
- [23] Palmer, W.C., and Havens, A.V., 1958. A Graphical Technique for Determining Evapotranspiration by the Thornthwaite Method. *Monthly Weather Review*, 123-128.
- [24] Pereira, A.R., and Pruitt, W.O., 2004. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 66: 251-257.
- [25] Bölük, E. 2016. Thornthwaite İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye İklimi. Araştırma Dairesi Başkanlığı Klimatoloji Şube Müdürlüğü, Ankara. https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/iklim_siniflandirmalari/Thornthwaite.pdf (accessed, 13.05.2023)
- [26] Karabulut, D. 2011. Kayseri'de Yağış Ve Sıcaklıkların Trend Analizi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 8 (1), 79-89.

- [27] Ünlükara, A., Yürekli, K., Anlı, A.S., and Örs, İ., 2010. Kayseri İlinin RDI (Reconnaissance) İndeksine Göre Kuraklığının Değerlendirilmesi. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3 (1): 13-17.
- [28] Akçakaya, A., Sümer, U.M., Demircan, M., Demir, Ö., Atay, H., Eskioğlu, O., Gürkan, H., Yazıcı, B., Kocatürk, A., Şensoy, S., Bölük, E., Arabacı, H., Açar, Y., Ekici, M., Yağan, S., Çukurçayır, F. 2015. Yeni Senaryolar ile Türkiye İklim Projeksiyonları ve İklim Değişikliği, Araştırma Dairesi Başkanlığı Klimatoloji Şube Müdürlüğü, Ankara. https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/IKLIM_DEGISIKLIGI_PROJEKSIYONLARI.pdf (accessed 13.05.2023)
- [29] Dadhich, G., Mathur, P. 2016. A GIS based Analysis for Rooftop Rain Water Harvesting. *International Journal of Computer Science & Engineering Technology (IJCSET)*, 7 (4), 129-143.
- [30] Patel, U. R., Patel, V. A., Balya, M.I., Rajgor, H. M. 2014. Rooftop Rainwater Harvesting (RRWH) at SPSV Campus, Visnagar: Gujarat - A Case Study. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3 (4), 821-825.
- [31] Hari, D., Reddy, K. R., Vikas, K., Srinivas, N., Vikas, G., 2018. Assessment of rainwater harvesting potential using GIS. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 330, 012119.
- [32] Ali, S., Sang, Y.F. 2023. Implementing rainwater harvesting systems as a novel approach for saving water and energy in flat urban areas. *Sustainable Cities and Society*, 89, 104304.
- [33] Mishra, S. S., Shruthi, B. K., Rao, H. J. 2020. Design of Rooftop Rainwater Harvesting Structure in a University Campus. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8 (5), 3591-3595.
- [34] Silvia, C. S., Ikhsan, M., Safriani, M., Gusmilia, T. P. 2021. Efficiency Rainwater Harvesting at the Roof Campus Buildings. *International Journal of Engineering, Science & Information Technology (IJESTY)*, 1 (3), 17-22.
- [35] Ayog, J. L., Bolong, N., Makinda, J. 2015. Feasibility Study of Rainwater Harvesting in Universiti Malaysia Sabah's Residential Colleges in Support of the Eco-Campus Initiative. *BIMP Journal of Regional Development*, 1 (1), 1-9.
- [36] Chiu, Y-R. 2012. Simulation-based Spatial System for Rainwater Harvesting Systems In the Sustainable Campus Project, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 11 (1), 213-217.
- [37] Özölçer, İ. H. 2016. Rainwater Harvesting Analysis for Bülent Ecevit University Central Campus. *Karaelmas Fen ve Müh. Dergisi*, 6 (1), 22-34.
- [38] Saeedi, I., Goodarzi, M. 2020. Rainwater harvesting system: a sustainable method for landscape development in semiarid regions, the case of Malayer University campus in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 1579-1598.
- [39] Yiğit, A.Y., Orhan, O., Ulvi, A. 2020. Investigation of The Rainwater Harvesting Potential at the Mersin University, Turkey. *Mersin Photogrammetry Journal*, 2 (2), 64-75.
- [40] Gomes, Y. R. M., Jucá, M. V. Q., Batista, L. F. D. R., Neto, A. R., dos Santos, S. M. 2021. Rainwater harvesting potential in water abundant and scarce regions in northeast Brazil using remote sensing. *Sustainable Water Resources Management*, 7, 60.
- [41] Machado, R. E., Cardoso, T. O., Mortene, M. H. 2022. Determination of runoff coefficient (C) in catchments based on analysis of precipitation and flow events. *International Soil and Water Conservation Research*, 10, 208-216.
- [42] Mahmoud, S. H., Mohammad, F. S., Alazba, A. A. 2014. Determination of potential runoff coefficient for Al-Baha Region, Saudi Arabia using GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 2041-2057.
- [43] Park, D. G., Sandoval, N., Lin, W., Kim, H., Cho, Y. H. 2014. A case study: Evaluation of water storage capacity in permeable block pavement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18 (2), 514-520.
- [44] Wang, D. C., Wang, L. C., Cheng, K. Y., Lin, J. D. 2010. Benefit analysis of permeable pavement on sidewalks. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 3 (4), 207-215.
- [45] Alim, M. A., Rahman, A., Tao, Z., Samali, B., Khan, M. M., Shirin, S. 2020. Suitability of roof harvested rainwater for potential potable water production: A scoping review. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119226.
- [46] Thanapura, P., Helder, D. L., Burckhard, S., Warmath E., O'Neill, M., Galster, D. 2007. Mapping Urban Land Cover Using QuickBird NDVI and GIS Spatial Modeling for Runoff Coefficient Determination. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73 (1), 057-065.
- [47] Capehart, M.A., Eden, S. 2021. Choosing Large-scale Rain Harvesting for Potable Supply Guide for Rural Homeowners in Arizona. Retrieved from <https://wrrc.arizona.edu/sites/wrrc.arizona.edu/files/attachment/large-scale-water-harvesting.pdf> (access in 25.10.2023).
- [48] Abdulla, F. 2020. Rainwater harvesting in Jordan: potential water saving, optimal tank sizing and economic analysis. *Urban Water Journal*, 17 (5), 446-456.
- [49] Wichowski, P., Rutkowska, G., Kamiński, N., Trach, Y. 2019. Analysis of Water Consumption in the Campus of Warsaw University of Life Sciences in Years 2012-2016. *Journal of Ecological Engineering*. 20 (5), 193-202.
- [50] Water Consumption at Al-Quds University. 2023. <https://sustainability.alquds.edu/water-consumption-at-al-quds-university-25-litres-per-person-per-day/>(accessed, 06.11.2023)
- [51] Lipschutz, R.D., De Wit, D., and Lehmann, M. 2017. Sustainable Cities, Sustainable Universities: Re-Engineering the Campus of Today for the World of Tomorrow. ss 3-16. Filho, W. L., Brandli, L., Castro, P., Newman, J. ed.

2017. Handbook of Theory and Practice of Sustainable Development in Higher Education, Springer Cham, 486s.

- [52] Vasileva, R., Rodrigues, L., Hughes, N., Greenhalgh, C., Goulden, M., Tennison, J. 2018. What Smart Campuses Can Teach Us about Smart Cities: User Experiences and Open Data. *Information*, 9 (251), 1-13.
- [53] Saadatian, O., Sopian, K.B., and Salleh, E. 2013. Adaptation of sustainability community indicators for Malaysian campuses as small cities. *Sustainable Cities and Society*, 6, 40-50.

SPT Based Liquefaction Hazard Assessments in Iğdır City (Türkiye)

Yusuf Güzel *¹, Muhammed Alperen Özdemir²

*¹ Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering and Architecture, Civil Engineering, KONYA
² Iğdır University, Faculty of Agriculture, Civil Engineering, IĞDIR

(Alınış / Received: 23.01.2024, Kabul / Accepted: 31.03.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

Keywords

Seismic intensity level,
Standard penetration test,
Liquefaction potential index,
Liquefaction severity index,
Liquefaction potential
mapping

Abstract: Seismically active regions are always prone to be subjected to earthquake events and their eventual damages to urban areas. Liquefaction is one of the earthquake related incidents occurring within soil bodies during or after earthquake excitations. Gaining the knowledge of liquefaction potential for a site is exceedingly crucial in view of seismic risk mitigation, earthquake hazard assessments and future planning of urban areas. This study evaluates the liquefaction potential of Iğdır city located in the eastern-side of Türkiye, having borderlines with three other seismically active countries in the region, Armenia, Nakhichevan and Iran. Soil data (i.e., Standard Penetration Test values, water table, water content, unit weight, grain size distribution and Atterberg limits) at the considered areas within the city is gathered from 85 boreholes. After investigating the fault lines around the city, the two possible maximum peak ground accelerations involved in this study are determined to be 0.393g and 0.225g. Liquefaction susceptibility maps of the areas at the two peak ground acceleration levels are designated in regard to liquefaction potential index and liquefaction severity index methods. The studied areas in the city exhibit various levels of liquefaction susceptibility as the severity is observed to be greater under the larger peak ground acceleration.

Iğdır İlinde Sıvılaşma Tehlikesi Değerlendirmesi (Türkiye)

Anahtar Kelimeler

Sismik şiddet seviyesi,
Standard Penetrasyon
deneyi,
Sıvılaşma potansiyel
indeksi,
Sıvılaşma şiddet indeksi,
Sıvılaşma potansiyel
haritası

Öz: Sismik olarak aktif bölgeler her zaman deprem olaylarına ve bunların kentsel alanlara nihai zararlarına maruz kalmaya eğilimlidir. Sıvılaşma, deprem uyarımları sırasında veya sonrasında zemin içerisinde meydana gelen olaylardan biridir. Bir sahanın sıvılaşma potansiyeli hakkında bilgi edinmek, sismik riskin azaltılması, deprem tehlikesi değerlendirmeleri ve kentsel alanların gelecekteki planlaması açısından son derece önemlidir. Bu çalışma, Türkiye'nin doğusunda yer alan ve bölgedeki diğer üç sismik olarak aktif ülke olan Ermenistan, Nahçıvan ve İran ile sınırı bulunan Iğdır şehrinin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmektedir. Şehir içinde ele alınan alanlardaki zemin verileri (Standart Penetrasyon Testi değerleri, su tablası, su içeriği, birim hacim ağırlık, tane boyutu dağılımı ve Atterberg limitleri) 85 sondaj kuyusundan toplanmıştır. Şehir çevresindeki fay hatları incelendikten sonra, bu çalışmada yer alan iki olası maksimum yer ivmesi 0.393g ve 0.225g olarak belirlenmiştir. En büyük iki yer ivmeleri altında çalışma sahalarının sıvılaşma duyarlılık haritaları, sıvılaşma potansiyel indeksi ve sıvılaşma şiddet indeksi yöntemlerine göre belirlenmiştir. Şehirde incelenen alanlar, maksimum yer ivmesi altında şiddetin daha fazla olduğu gözlemlendiğinden, çeşitli seviyelerde sıvılaşma duyarlılığı sergilemektedir.

*İlgili Yazar, email: yusufkurtdereli@hotmail.com

1. Introduction

Liquefaction is known as one of the earthquake triggered phenomena attributed to stress and stiffness losses due to increase of pore water pressure within saturated granular soil bodies. When soil layers no longer possess enough strength characteristics during earthquake excitations, the soil behaves as a viscous liquid [1]. This makes the ground surface structures to endure, to some extent, varied types of damages that burden great level of economic costs and, probably and most importantly, human casualties. Slope failures, earth dam failures, building and bridge foundation failures and damages to the pavement and buried infrastructures (i.e. gas, electric, and water pipelines) are the main consequences of liquefaction phenomenon [2]. Such types of damages were observed early in 1964 during and after the Good Friday earthquake in Alaska and the Niigata earthquake in Japan [3]. Moreover, relatively recently occurred the Duzce earthquake in 1999 [4], the Christchurch earthquake in 2010 [5], the Emilia earthquake in 2012 [6], the Japan earthquake in 2011 [7] and Indonesia earthquake in 2018 [8] led to liquefaction related failures and damages to urban areas. Lastly, the twin Maras earthquake events on the 6th of March 2023 caused liquefaction related building failures in many affected areas, especially in Gölbaşı (Adıyaman) and Iskenderun (Hatay) districts [9, 10].

Occurrences of earthquake events featured by aleatory uncertainty are sudden and unforeseen, therefore the liquefaction triggering at any site [11]. However, this random uncertain natural event and, specifically, its cause of liquefaction, at a specific site should have to be determined in order to; (1) mitigate such effect on mainly buildings, bridges, roads and buried pipelines, (2) realise seismic hazard risks and (3) planning of the urban areas [12]. Hence, characterisations of sites regarding the liquefaction potential under possible earthquake events gained great interest of geotechnical and geological engineering communities.

Liquefaction potential of a given site can often be determined based on laboratory and field tests. Laboratory test results are always regarded as sceptical since taking samples from the soil ground, transporting to the laboratories and placing the samples to the test machines may disturb the original soil structures [13, 14]. In contrast, field tests produce relatively more sustainable soil data free from the issues confronted in laboratory tests [2]. Hence, field tests have seen as better choice over the laboratory tests. Common field tests practised with the aim of delineating liquefaction potential of soil layers are Cone Penetration Test (CPT), Standard Penetration Test (SPT) and Becker Penetration Test along with the shear wave velocity (V_s) measurement techniques. When CPT test and V_s measurement can still convey the liquefaction potential of the soils [15-16], SPT based liquefaction assessments are overwhelmingly applied in geotechnical and geological engineering studies [18-20]. In this regard, the study conducted by [2] presented the liquefaction potential in the Kahramanmaraş city situated on the East Anatolian and Dead Sea Faults. They used 238 geotechnical boreholes to analyze and map the liquefaction risk over the city. In addition, the city of Erzincan was also studied for the liquefaction potential under different seismic intensities [21]. Since the city is positioned close to the both main fault lines (North Anatolian and East Anatolian fault lines), the study clearly indicated the liquefaction potential by utilizing the SPT data. Moreover, the liquefaction potential of Battalgazi region (in the Malatya city sitting nearby the East Anatolian Fault) was evaluated, along with the site amplification, based on the measured SPT values [22]. The V_s and SPT based liquefaction assessments were also made for Erzurum (Van) as the liquefaction cases were observed during the October 23, 2011, Van earthquake [23]. The predictions of the study were shown to represent the actual scenarios.

Specific focus of this study is an urban area of Igdir province in the eastern Anatolian region of Türkiye. It aims to map the liquefaction potential of the location based on in-situ test results. The area falls within the Ararat Basin, which was created by the geological shifts of the Eurasian and Arabian plate boundaries, along with other nearby basins such as Rioni, Kura, Mid-Araks, and Nakhichevan [24]. The Ararat Basin is bordered to the northwest by the Aragats and Gegham volcanic formations and to the south by the volcanic Mount Ararat. The area is located on quaternary alluvium and surrounded by sedimentary rocks (i.e., slope debris, alluvial fan deposits, and moraines) as well as clastic rocks. Moreover, volcanic rocks such as basalt and andesite are present towards Mount Ararat. Since the province neighbors with Armenia in the north-east, Nakhichevan in the south-east and Iran in the south, its location is one of the unique geographical locations in the world. The province is also growing in terms of population, as at the beginning of the century, it has 174 285 population and in 2022 the population reaches to 203 594 by almost %17 of increase [25]. Due to its distinctive position suitable for trade and therefore for industrial developments, the growing population is likely to rise even more rapidly. Thus, mapping the liquefaction of the three different parts of the city, which has not been conducted before, can be beneficial in mitigating seismic effect of possible future earthquake events, depicting seismic hazard risks and for future planning. The geological maps presented throughout the paper are produced by means of geographic information systems (GIS) software. The paper carries on with describing the location and its seismicity in details. In addition, the locations of SPT boreholes are illustrated. Subsequently, the methods used to delineate the liquefaction potential of the site are presented. Lastly, the liquefaction maps of the studied area are interpreted with some comparisons.

2. Location of Iğdır province

The Iğdır province is positioned in between approximately 39° - 41° latitude northerly and 43° - 45° longitude easterly [26]. The considered study site is the urban area of the Iğdır province covering the city centre as shown in Figure 1. The province consist of mostly mountainous fields, but almost %30 of the area formed by plain land, so called Iğdır plain. The population, including the main city, has largely been settling in the plain area. The plain remains between Mount Ararat and the Caucasus Mountains causing the plain to be featured with the bowl-shape structure [27].

The soil of the plain region is characterised substantially by quaternary alluvial soils covering a land of around 922 km². The alluvial soil is formed over time by the depressions of Aras river connected with various straits. In fact, Aras River is accepted as border between Türkiye and Armenia and is the main cause of recent soil formations in Iğdır plain at the Türkiye side, and Revan plain at the Armenian side, with almost equal sizes. These two plain areas are sit on top of Surmeli and Sahat concavities at the Türkiye and Armenian sides, respectively [28].

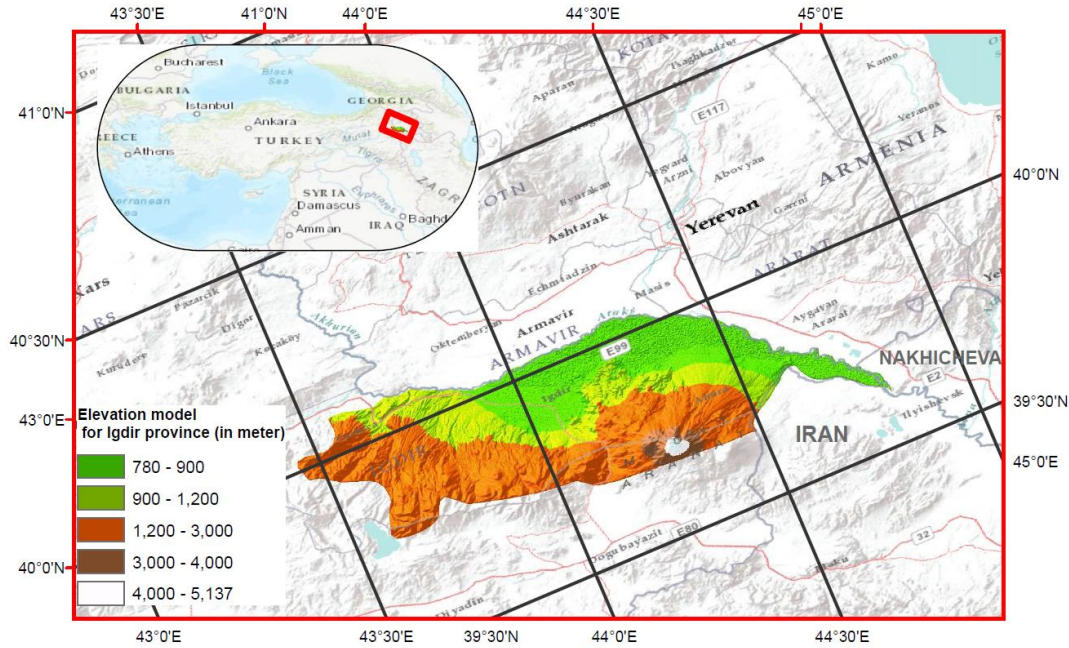


Figure 1. Elevation model for the Iğdır province demonstrating the mountainous and plain areas

3. Seismicity of the Site

Türkiye is known as one of the seismically active countries in the world, as it sits on top of mostly Anatolian and partially Arabian and Eurasian plates. As a result of relative movement of Arabian plate toward northwards with a rate of 6-10 mm per year, Anatolian plate is pushed to the westwards with a rate of 18.7- 21.5 mm per year [29, 30]. The contrast between these three plates create two main fault lines, recognised as North Anatolian Fault Zone (NAFZ) and East Anatolian Fault Zone (EAFZ). Moreover, these tectonic plates are the causes of many fault lines formed over the countries of Türkiye, Greece, Armenia and Iran.

Within 100 km distance in radius from the Iğdır city center, there has been, in total, 89 earthquake events recorded with magnitudes greater than or equal to 4.00 [31]. The epicenter of the events are illustrated in Figure 2. The number of earthquake events taken place within the scale at different magnitude ranges is presented in Table 1. It is clear that, as the magnitude range increases, the occurrence of such event reduces. For instance, at 4-4.50 and 4.50-5.00 magnitude ranges, 45 and 20 earthquake events have been recorded when only 9 and 5 records are available at 5.00-5.50 and higher than 5.50, accordingly. In other words, the small magnitude earthquake events are frequent and but less destructive, while the big earthquake events are relatively rare but more destructive and pertinent.

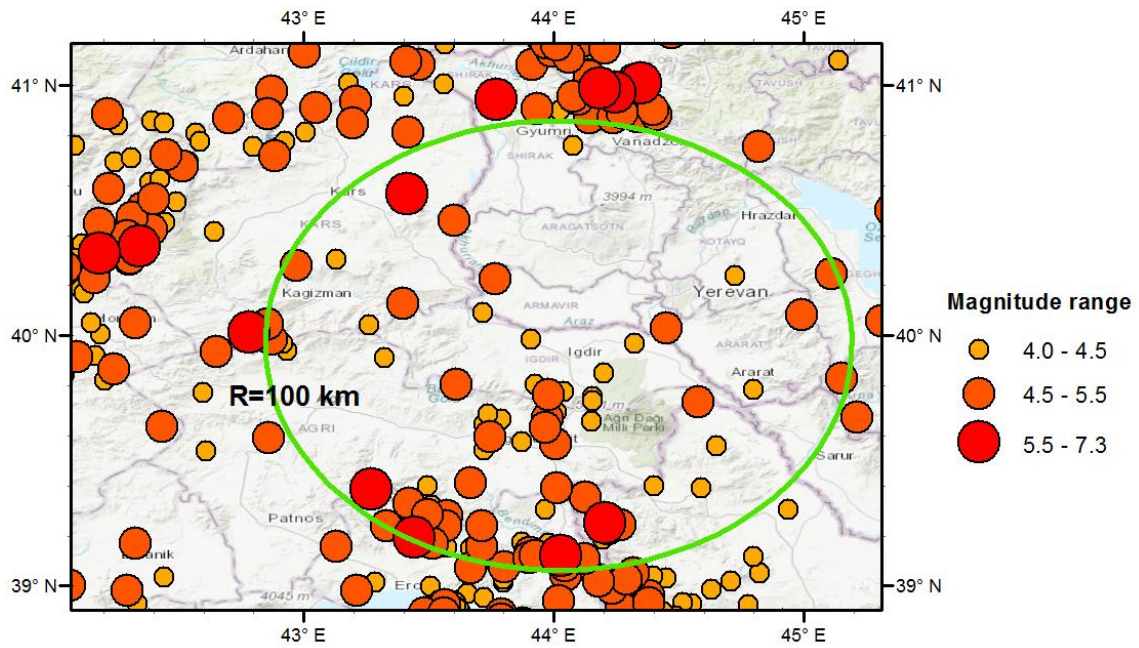


Figure 2. Location of past earthquake events taken place around the area of interest including the circle centered by 100 km in radius from the Iğdır city center

Table 1. Number of past earthquake events at various magnitude ranges occurred within the 100 km radius around the Iğdır city center

Magnitude range	4.00-4.50	4.50-5.00	5.00-5.50	>5.50
Number of event	45	20	9	5

Several active earthquake fault lines surrounding Iğdır city are demonstrated in Figure 3. It is important to stress here that only active fault lines in the Türkiye side, which have relatively recently been updated by Emre et al. [32], is considered as can be depicted from the figure. Active fault lines in the Armenia, Nakhcivan and Iran sides neighboring the Iğdır province are not presented since up-to-date active fault lines are not available. In fact, an extensive study carried out in 2004 by Karakhanian et al. [33] focused on fault lines and past earthquake events occurred over those lines in Armenia, eastern Türkiye and northwestern Iran. However, the presented fault lines in the aforementioned study, in the eastern Türkiye covering the study area, were significantly changed when compared with the active fault lines presented in Figure 3. Such changes may also be conceivable for the active faults in the neighboring countries. Therefore, the fault lines at the neighboring countries and hence any likely possible earthquake events are not taken into consideration in this study.

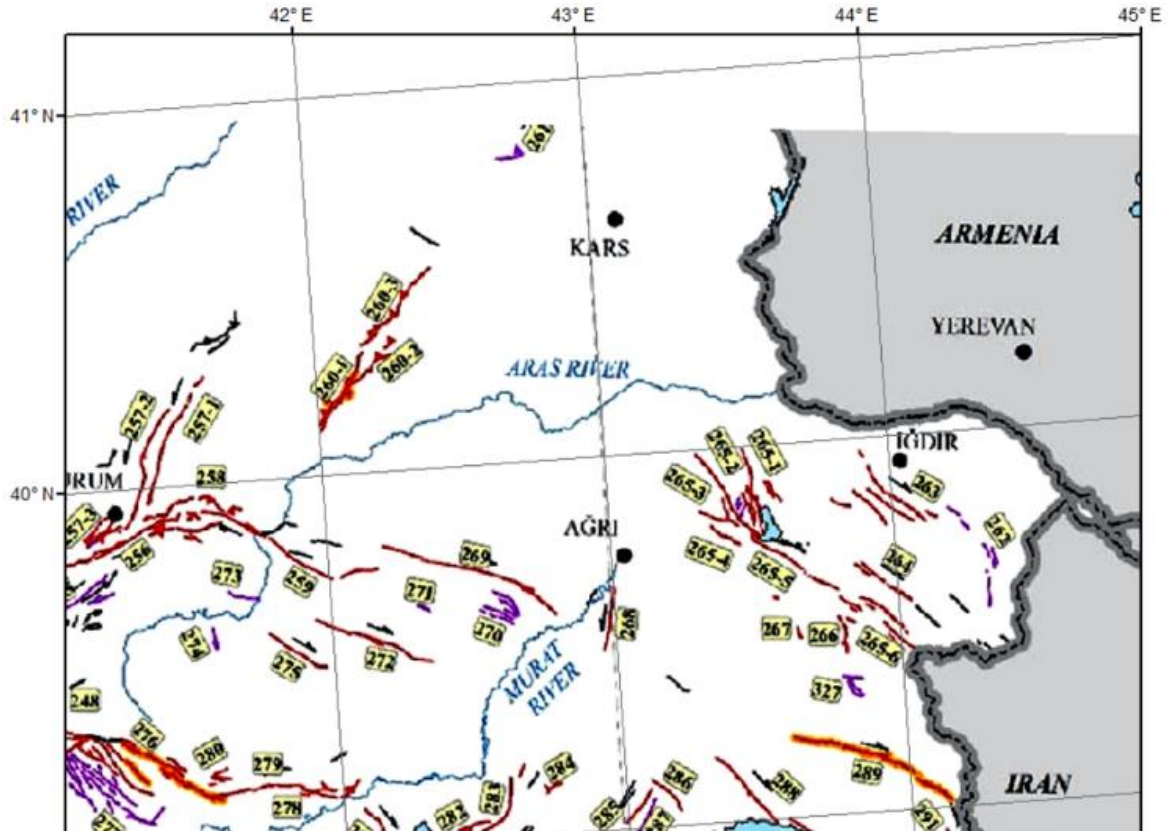


Figure 3. Active fault lines around the studied area of Iğdır [25]

The nearest fault line called Iğdır Fault Zone with ID of 263, is just about 7.40 km distance to the area of interest. In addition, there are other active fault lines whose locations are shown in Figure 3 which may trigger earthquake events that may cause some level of hazards in the study area. General properties of the fault lines are given in Table 2. In order to determine largest earthquake event likely to occur at the active fault lines, the equation proposed by Wells and Coppersmith [34] is applied. The equation depicts the moment magnitude (M_w) by relying on the surface rupture length (SRL).

$$M_w = 5.08 + 1.16 \log (SRL) \quad (1)$$

Based on this equation, it is clear that magnitude of an earthquake event to be happened over the fault line depends on its length. Therefore, the highest magnitude earthquake event is likely to occur in the Perilidag Section with M_w of 6.83, followed by Tirso Gölü Section with M_w of 6.80 and Iğdır Fault Zone with M_w of 6.78 for the fault line lengths of 32 km, 30 km and 29 km, respectively. Magnitudes of potential earthquake events at the other fault lines are included in Table 2.

Table 2. Active fault lines around the studied area and the largest possible earthquake events possible to take place along these faults

Fault Name		ID	Type	Length	M_w	Distance to the study area (km)	PGA (g)
Iğdır FZ		263	RL	29	6.78	7.40	0.393
Dogubeyazit F		264	RL	20	6.60	28.85	0.126
Ağrı EF		262-3	NN	11	6.30	17.00	0.225
		262-1	NN	8	6.13	32.74	0.140
		262-2	NN	9	6.19	41.40	0.122
Bahıngölü FZ	Candeviş S	265-1	RL	25	6.70	35.80	0.200
	Perilidag S	265-2	RL	32	6.83	41.40	0.194
	Kovancık S	265-3	RL	10	6.24	43.73	0.120
	Tirso Gölü S	265-4	RL	30	6.80	49.90	0.160
	Yeni Cadır S	265-5	RL	17	6.50	38.50	0.163
	Cetenli S	265-6	RL	18	6.54	38.83	0.166

FZ; Fault Zone, F; Fault, EF; Extensional fissure, S; Segment, RL; Right Lateral, NN; Normal

The peak ground accelerations (PGA or a_{max}) likely to be experienced at the studied area due to the predicted earthquake events should be determined. This is because of the fact that the magnitude of an earthquake event can demonstrate its energy level, but cannot give any indication of its hazards to the considered area. In contrast, PGA can better illustrate the impact level of such event. In particular, the prediction of PGA is necessary to represent the liquefaction potential of the area. While there are several ground motion attenuation equations proposed to predict PGA, this study utilised the one developed by Ulusay, Tuncay [35] based on the local-based (Türkiye) earthquake data. The associated ground motion prediction equation is given below.

$$PGA = 2.18e^{0.0218(33.3M_w - R_e + 7.8427S_A + 18.9282S_B)} \quad (2)$$

in which, $S_A=0$, $S_B= 0$ for rock, $S_A=1$, $S_B= 0$ for stiff soil and $S_A=0$, $S_B= 1$ for loose soil. R_e is a distance measured from the closest point of the fault line to the area of interest. In this sense, considering the magnitude level of a potential earthquake event at the Igdir Fault Zone and its closeness to the study area with just about 7.5 km, it may cause the largest PGA, that is equal to 0.393g, at the site. Second largest PGA of 0.225g may be recorded, when an earthquake event is triggered at the Agri Extension Fissure (fault ID of 262-3), as tabulated in Table 2. This is followed by the any likely earthquake event at the two sections of the Balıkgölü Fault Zone (i.e. Candervis Section with fault ID of 265-1 and Perilidag Section with fault ID of 265-2) resulting in PGA of 0.20g and 0.194g at the site, respectively. Other potential PGA at the study area under foreseeable earthquake events at the regarded fault lines are given in Table 2. Important to note here that the maximum probable PGA in 475 years of return period (%10 probability of exceedance in 50 years) is given as, on average, around 0.25g for the studied area (Ministry of Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD) [31]), which is distinctively lower than the maximum PGA predicted from the deterministic approach. Therefore, this study considers only first two highest possible PGA values that are 0.393g and 0.225g calculated based on the above deterministic approach. Considering the fault lines around the study area from Türkiye side as well as from Armenian side, adapting deterministic approach may be more reliable in assessing the liquefaction potential.

4. Study Areas and Geotechnical Features

In this study, three separate regions called as Area_1, Area_2 and Area_3 at Igdir city are taken into consideration, as highlighted in Figure 4. While the Area_1 involves only Yeni Mahalle district, the Area_2 and the Area_3 consist of Konakli, 7 Kasim, Ozgur, Konakli and Karaagac districts and Emekli, Alikemerli and Hakveyis districts, respectively. The studied Area_1 covers approximately 1.00 km², the Area_2 and the Area_3 occupy lands of 4.50 km² and 3.40 km², accordingly. As the geotechnical data is attained from the local municipality (Igdir), the data is esteemed to be reliable to conduct this study.

In total, 85 boreholes were opened to investigate the geotechnical characteristics of the areas. 68 boreholes were explored until the depth of 15 m, when only 17 boreholes extend to the depth of 20 m. Mainly, grain-size distribution, Atterberg limits, unit weight, ground water levels and Standard Penetration Test values (SPT-N) were determined. The soils were classified in compliance with the Unified Soil Classification System (USCS). From the sieve analysis, the soil layers are characterised by mostly fine grained soils comprising %75 of the total soil bodies and partially by coarse grained soils encompassing %25 of the total soil bodies. Fine grained soil layers are made of low or high plastic clay and silt with the inclusions of gravel and sand soils. Similarly, coarse grained soil layers include mainly sand and occasionally gravel involving silt and clay materials. The maximum-minimum plastic limit (PL) and liquid limit (LL) values available for the characterised soils equal to 77.9-26.2 (%) and 42.1-12.4 (%), respectively. The water content of the soils at the site ranges from 1.7 (%), realised above the water table to 57 (%) as maximum available below the water table. The soil densities measured were varied between 17.7 kN/m³ and 19.2 kN/m³.

The water levels at the boreholes get mostly as low as to 1.5 m from the ground surface, and reaches to 5 m at several locations. Water table distributions within the studied areas are illustrated in Figure 5. It is clear that the water table measured at all boreholes within the Area_1 varies only between 1.5 m and 2.00 m (Figure 5a), while, within the Area_2, it ranges from 1.50 m to 2.00 m (Figure 5b). The water levels at the Area_3 are mostly varies between 4.00 m to 5.00 m, as seen in Figure 5c, when only 3, 1 and 2 boreholes kept water tables at 1.50-2.00 m, 2.00-3.00 m and 3.00-4.00 m depth ranges. The measured SPT-N values at the boreholes extended from 3 to 51. In general, the SPT-N values increased with depth, but fluctuate at some boreholes as encountered with relatively softer soil layers. Three SPT-N profiles (one borehole in each area) and their changes through the borehole depths are demonstrated as an example along with the correlated shear wave velocity (V_s) values in Figure 6. The recent

study conducted by Guzel [36] provides correlation between SPT-N and shear wave velocity (V_s) values for the area, as such:

$$V_s = 199N^{0.0626} \quad (3)$$

The average V_s values at the associated boreholes are 243.35 m/s, 244 m/s and 230 m/s, respectively.

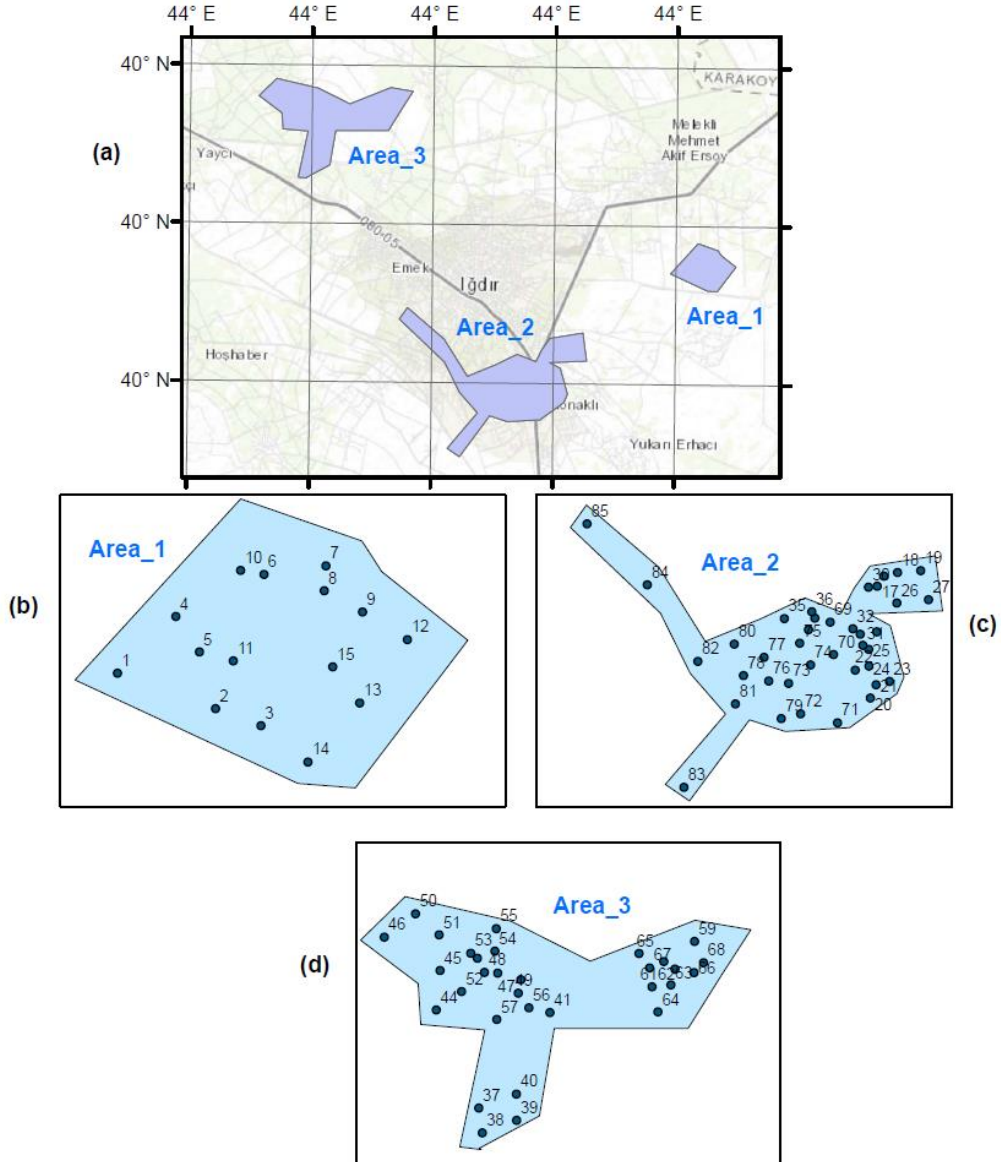


Figure 4. (a) Borders and Locations of the studied areas within the Igdir city, (b) positions of the boreholes within the Area_1, (c) positions of the boreholes within the Area_2 and (d) positions of the boreholes within the Area_3

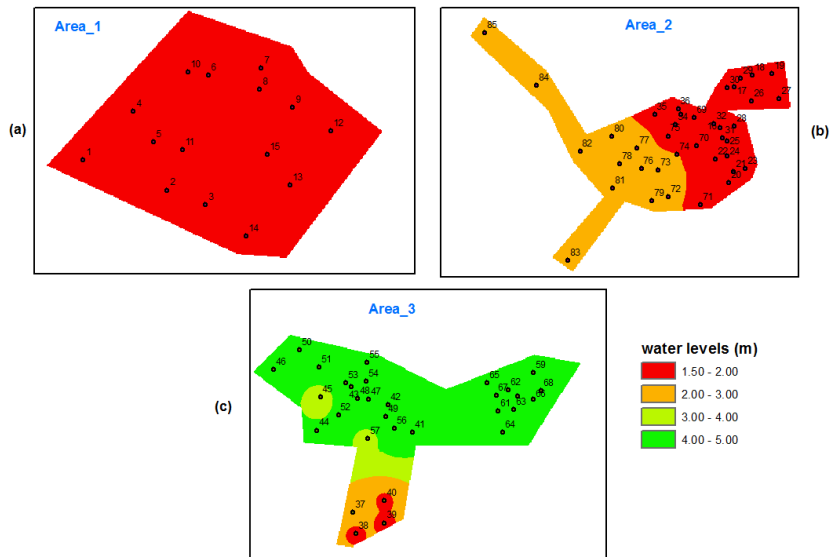


Figure 5. Water level distributions over the studied Area_1 (a), Area_2 (b) and Area_3 (c) based on the measured water levels at the associated boreholes

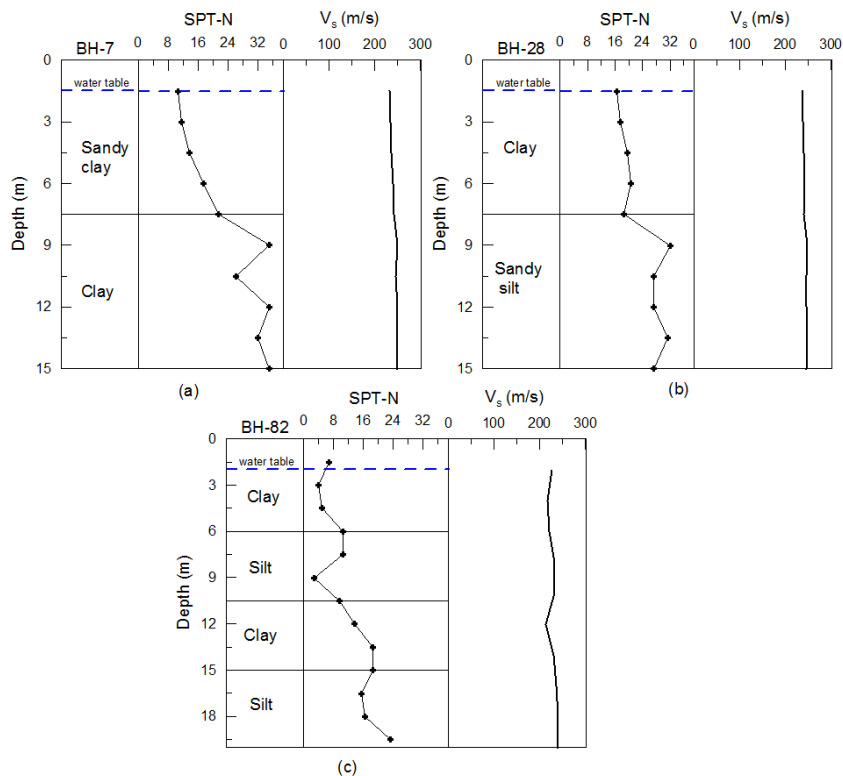


Figure 6. Three exemplary SPT-N profiles and correlated V_s values located in; (a) Area_1 (BH-7), (b) Area_2 (BH-28) and (c) Area_3 (BH_82)

5. SPT Based Liquefaction Assessment Methods

The liquefaction potential of a soil layer can be assessed through laboratory testing or on-site test methods, as well as through empirical techniques. Empirical methods, which rely on on-site penetration testing, are commonly utilized because of the challenges of obtaining appropriate soil samples testing on laboratory environments. The Standard Penetration Test (SPT) is a popular in situ test choice for evaluating the risk of liquefaction, and is widely used in many countries, including Türkiye. In this study, the potential for liquefaction was analyzed using the simplified SPT-based method introduced by Seed and Idriss [37] and Seed et al. [38]. The modifications suggested by Youd et al. [19] were also considered. The corrected SPT-N values were calculated using the equation provided by Liao and Whitman [39]. The cyclic stress ratio (CSR), defined as the amount of cyclic shear stress needed to cause liquefaction, was first proposed by Seed and Idriss [18]. Youd et al. [19] made a slight modification to the calculation of CSR. Seed et al. in 1985 presented an empirical correlation between corrected $SPT(N_1)_{60}$ and CSR. The empirical correlation curves, which are the same as the liquefaction triggering curves, depict the capacity of

soil to resist liquefaction, referred to as the cyclic resistance ratio (CRR). Youd et al. [19] modified the CRR curves from Seed et al. [38], including those for clean sands and magnitude 7.5 earthquakes. The CRR curves provide the limiting conditions for determining if liquefaction will occur for a magnitude 7.5 earthquake. Moreover, CRR curves were developed for granular soils with fine contents of %5 or less, %15, and %35 [19].

In this study, the Cyclic Resistance Ratio (CRR) equation proposed by Youd et al. [19] was used. To evaluate the risk of liquefaction, a factor of safety (F_s) equation was developed, which considers CRR_{7.5}, Cyclic Stress Ratio (CSR), and Maximum Scaling Factor (MSF) as represented by the following formula:

$$F_s = (CRR_{7.5}/CSR)MSF \quad (3)$$

The Magnitude Scaling Factor (MSF) was utilized as described in Eq. 4 [19].

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (4)$$

CRR and CSR were calculated based on the equations originally given by Seed et al. [38]:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (5)$$

$$CSR = 0.65(\alpha_{max}/g)(\sigma_{vo}/\sigma'_{vo})r_d \quad (6)$$

In which, α_{max} is the maximum ground acceleration, g is the acceleration of gravity, σ_{vo} and σ'_{vo} are total and effective overburden stresses and r_d is the stress reduction coefficient. The value of r_d is computed from the following depth- dependent equations:

$$\begin{aligned} r_d &= 1 - 0.00765z \text{ for } z \leq 9.15 \text{ m} \\ r_d &= 1.174 - 0.0267z \text{ for } 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \end{aligned} \quad (6)$$

$(N_1)_{60}$ in the Equation 5 is the corrected SPT-N (N_{30}) and obtained by using;

$$(N_1)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S \quad (7)$$

In which, N_m : the measured standard penetration counts, C_N : normalization of N_m with respect to the reference overburden pressure, C_E : hammer energy efficiency level, C_R : rod length dependent correction factor, C_S : borehole sampler correction. The overburden pressure correction factor, C_N , is calculated regarding the equation proposed by Liao and Whitman [39]:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}}\right)^{0.5} \quad (8)$$

Where, P_a is an atmospheric pressure of 100 kPa (1 atm) and σ'_{vo} is the effective overburden pressure. This value cannot exceed 1.70. Besides, since the amount of fine content involved in clean sand is shown to alter the liquefaction resistance of the soil, following fine content (FC) corrections are recommended.

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (9)$$

In which, α and β coefficients are determined regarding the extent of fine content inclusions, as:

$$\begin{aligned} FC \leq \%5, & \quad \alpha = 0 \text{ and } \beta = 1 \\ \%5 < FC \leq \%35, & \quad \alpha = \exp\left[1.76 - \left(\frac{190}{FC^2}\right)\right] \text{ and } \beta = [0.99 + (FC^{1.5}/1000)] \\ FC \geq \%35, & \quad \alpha = 5 \text{ and } \beta = 1.2 \end{aligned} \quad (10)$$

In the literature, the susceptibility of loose sand layers to liquefaction has been investigated up to a depth of 20 meters from the surface [37-42]. According to various studies, liquefaction occurs when the factor of safety is less than 1.0. Additionally, it is stated that the factor of safety ranging from 1.0 to 1.2 defines the liquefaction as marginally liquefiable, but no liquefaction will occur when the factor of safety is above 1.2 [42-44]. However, Seed and Idriss [46] noted that the acceptable factor of safety value for the liquefaction phenomenon is between 1.25 and 1.5.

Iwasaki et al. [47] introduced a liquefaction potential index (LPI) to overcome the limitations of the factor of safety (F_s). The LPI is divided into four categories of liquefaction potential, including very low, low, high, and very high, and is calculated using the following equations (Eqs. 11a, b, c, d and e).

$$LPI = \int_0^{20} F(z)W(z)dz, \quad (11a)$$

$$F(z) = 1 - F_L \text{ for } F_L < 1.0, \quad (11b)$$

$$F(z) = 0 \text{ for } F_L \geq 1.0, \quad (11c)$$

$$W(z) = 10 - 0.5z \text{ for } z < 20m, \quad (11d)$$

$$W(z) = 0 \text{ for } z \geq 20m \quad (11e)$$

The depth of the soil layer is represented by z , measured in meters, and F_L represents the factor of safety against liquefaction and equals to F_s . The classification of liquefaction potential is defined by the boundary values of the liquefaction potential index (LPI) which are presented in Table 3 along with the liquefaction susceptibility descriptions.

Table 3. Liquefaction potential classification suggested by Iwasaki et al. [47]

Liquefaction index (LPI)	Description
0	Very Low
$0 < LPI \leq 5$	Low
$5 < LPI \leq 15$	High
$15 > LPI$	Very high

$$F(z) = 0 \text{ for } F_L \geq 1.2, \quad (12a)$$

$$F(z) = 2 \times 10^6 e^{-18.427F_L} \text{ for } 1.2 > F_L > 0.95, \quad (12b)$$

$$F(z) = 1 - F_L \text{ for } F_L < 0.95 \quad (12c)$$

The probability of soil liquefaction (P_L) depends on the value of F . Sonmez and Gokceoglu [48] proposed the liquefaction severity index (L_s), and they preferred to use the P_L value in this index equation. According to Sonmez and Gokceoglu [48], it is believed that the use of a liquefaction probability equation in the calculation of a liquefaction index will provide more consistency. The liquefaction severity index (L_s) is calculated using the following equations (Eqs. 13a, b, c, d and e).

$$L_s = \int_0^{20} P_L(z)W(z)dz, \quad (13a)$$

$$P_L = \frac{1}{1+(F_L/0.96)^{4.5}} \text{ for } F_L \leq 1.411, \quad (13b)$$

$$P_L(z) = 0 \text{ for } F_L > 1.411, \quad (13c)$$

$$W(z) = 10 - 0.5z \text{ for } z < 20m, \quad (13d)$$

$$W(z) = 0 \text{ for } z \geq 20m \quad (13e)$$

The depth of the midpoint of the soil layer is represented by z and the factor of safety against liquefaction is represented by F_L in Eq. (13) for the calculation of the liquefaction severity index (L_s). The boundary values for L_s , along with descriptions of liquefaction susceptibility, are presented in Table 4.

Table 4. Liquefaction severity index value ranges

Liquefaction severity (L_s)	Description
$85 \leq L_s < 100$	Very High
$65 \leq L_s < 85$	High
$35 \leq L_s < 65$	Moderate
$15 \leq L_s < 35$	Low
$0 \leq L_s < 15$	Very Low
$L_s = 0$	Non-Liquefiable

6. Results and Discussions

6.1. SPT versus Cyclic Stress Ratio

The corrected $SPT(N_1)_{60}$ values and corresponding CSR values at 0.393g and 0.225g seismic intensity levels are plotted in Figure 7 along with the modified CRR curves given by Youd et al. [19]. The boundary CRR curves in Figure 7 are determined by the fine content of the granular soil (i.e. being higher than 35%, between 35% and 5%

and less than 5%) and, therefore, separates the graph into three regions. The curves are developed based on historical cases. For the PGA level of 0.393g, out of the 46 data, 17 of them fall into the liquefaction region, over the %35 fine content CRR curve. Only 3 of the soil data are between %35 and %15 fine content CRR curves and 12 of them are represented between %15 and %5 fine content CRR curves. For the lower PGA level (i.e., 0.225g), the number of soil data likely to experience liquefaction is reduced. For instance, only the 5 soil data are over the %35 fine content CRR curve and only the 10 soil data are fitted between the CRR curves. This is obviously due to the fact that the stress on soil induced by the 0.393g seismic intensity is greater than the stress caused by the 0.225g seismic intensity.

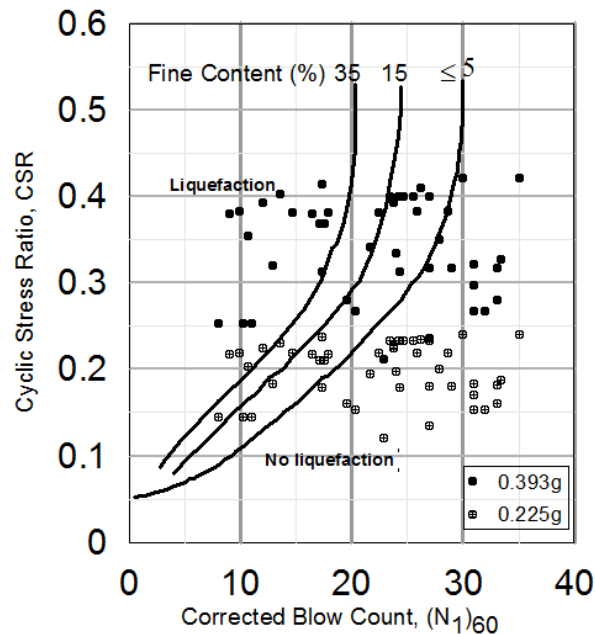


Figure 7. Computed cyclic stress ratio (CSR) with the measured SPT $(N_1)_{60}$ values at the 0.393g and 0.225g seismic intensity levels and cyclic resistance ratio (CRR) based on Youd et al. [19]

6.2. Liquefaction potential in regard to fine content

Additionally, hydrometer and Atterberg limits experiments were conducted on 288 soil samples obtained from various depths of 85 boreholes in alluvial deposit areas. The liquefaction potential of these soils (specifically in fine-grained soil layers) was also assessed using the method proposed by Seed et al. [41] (as shown in Figure 8). It is clear from the figure that the low-plastic silt soils (and also low-plastic silt soils with clay) are regarded to be susceptible to liquefaction. On the contrary, low- and high-plastic clay soils and high-plastic silt layers are unlikely to liquefy. Based on this method, 24 samples were classified into region A and 87 samples were classified into region B (as seen in Figure 8). Therefore, the fine-grained soil layers exist in the area also hold liquefaction potential.

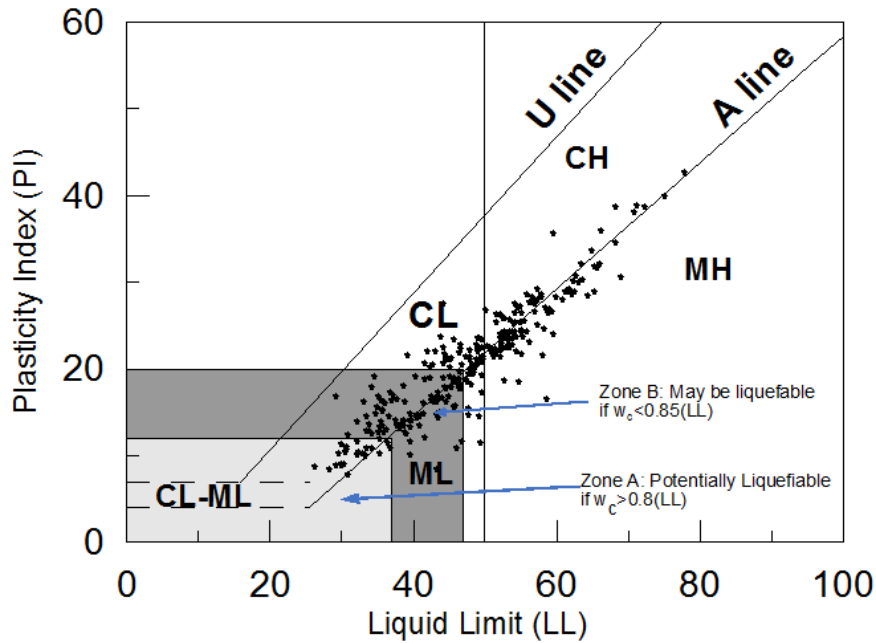


Figure 8. Liquefaction potential silty soil layers at the studied boreholes as described by Seed et al. [41]

6.3. Mapping of liquefaction potential

Liquefaction potential of the studied areas are assessed with respect to the two methods described in the previous section (LPI and L_s), mentioned in the previous section, suggested by Iwasaki et al. [47] and Sonmez and Gokceoglu [48]. The two highest PGA values of 0.393g and 0.225g that can be recorded at the site in future are regarded when the liquefaction potentials are mapped. The maps presented in this section are produced by means of geographic information systems (GIS) software. The computed LPI and L_s at SPT locations are interpolated with inverse distance weight (IDW) method. The interpolation method estimates the desired values at a location from the measured values at known certain locations by allocating weight values based on their distances to the location of estimate.

Based on the LPI values, likelihood of liquefaction occurrence within the Area_1 can be categorized as high, as demonstrated in Figure 9a. Only at three boreholes (BH-1, BH-5 and BH-9) the liquefaction potential is low as exact LPI values are 4.67, 4.54 and 4.19, respectively (as presented in Table 5). It is very high at only BH-7 with exact LPI value of 16.50. Besides, most part of the Area_2 is likely to experience liquefaction at very high or high levels, when the area is shaken by an earthquake event with PGA level of 0.393g (Figure 9b). The liquefaction potential is seen as low at 5 boreholes (BH-21, BH-23, BH-34, BH-35 and BH-36) in the same area since the computed LPI values are lower than 5, as seen in Figure 9b and Table 5. In contrast, in the north-west side of the city (Area_3), the liquefaction potential is very low, as LPI values obtained at all of the boreholes are equal to 0 or less than 5.00 (shown in Figure 9c and Table 5).

The liquefaction assessments of the areas with respect to the L_s values express less degree of liquefaction occurrence when compared with the LPI based assessment method under the same seismic intensity level. More specifically, the Area_1, in contrast to the liquefaction potential being high with respect to the LPI values, is characterized by low liquefaction severity (Figure 10a). The Area_3 is symbolized by non-liquefiable or very low liquefaction potential (Figure 10c), as in the case of LPI based method. The Area_2, though, is very likely to encounter liquefaction effect extending from mostly high level to moderate level, as can be depicted from Figure 10b. The liquefaction potential at the remaining area is dominantly low and only very low at 5 boreholes (BH-21, BH-23, BH-34, BH-35 and BH-36). However, most of the Area_2 is at very high level of liquefaction potential risk when the LPI values are regarded.

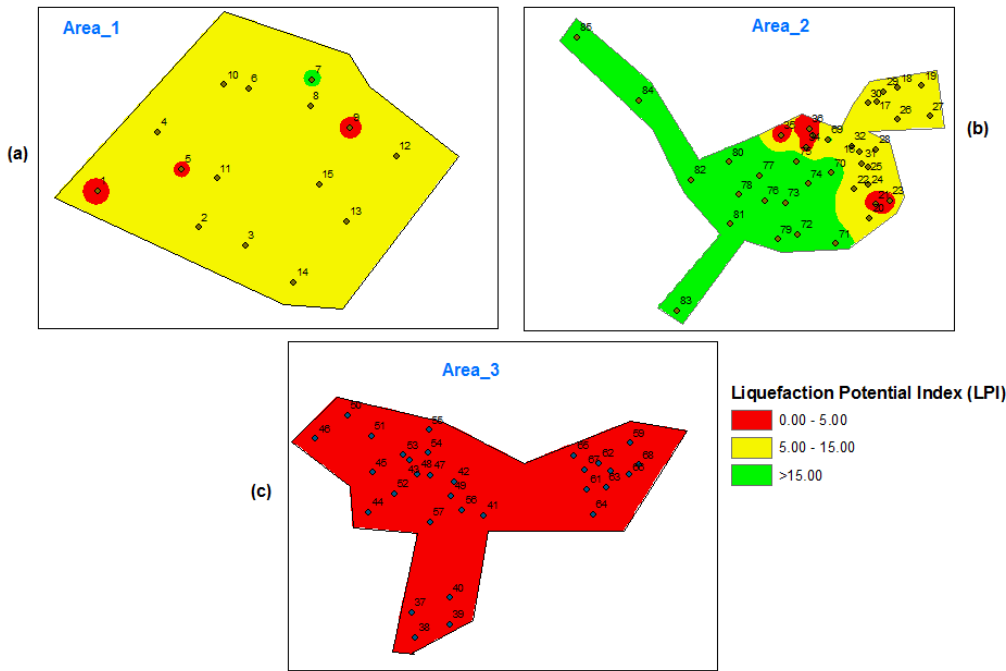


Figure 9. Liquefaction Potential Index (LPI) of the studied areas when 0.393g peak ground acceleration is considered

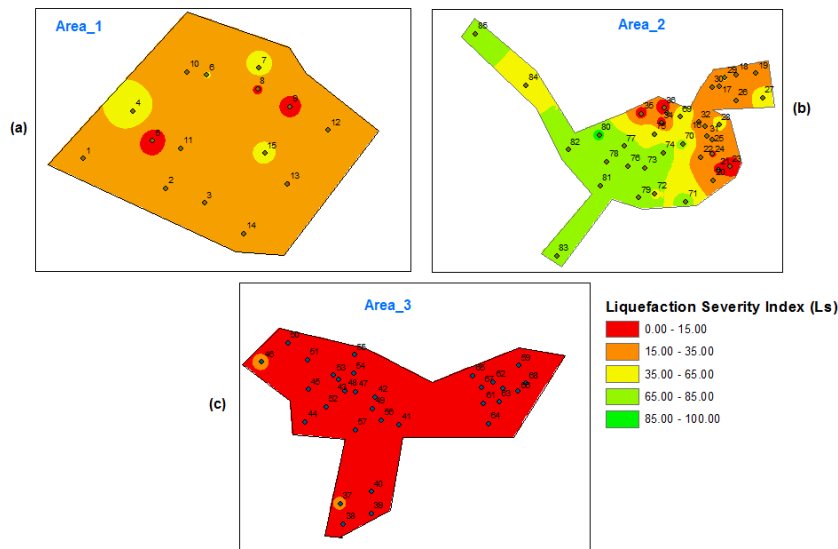


Figure 10. Liquefaction Severity Index (L_s) of the studied areas when 0.393g peak ground acceleration is considered

In the case of implementing the second largest possible peak ground acceleration, the investigated areas are less likely to experience liquefaction at the greater extent as the examined PGA reduces from 0.393g to 0.225g. Specifically, the Area_1, Area_3 and most part of the Area_2 own very low level of LPI values being 0 or less than 5 (can be seen in Figures 11a-c and Table 5). In the area_2, only at 7 boreholes (BH-72, BH-75, BH-77, BH-80, BH-84 and BH-85) possess high level of liquefaction which can be observed from Figure 11b and Table 5. The LPI values at these boreholes are 6.03, 8.31, 5.65, 11.98, 5.21 and 7.05, respectively. In the same way, the L_s values for the Area_1 and Area_3 suggest very low liquefaction severity (Figures 12a, c). However, at the large parts of the Area_2, there is still moderate and low levels of liquefaction severity since the L_s values extend from 15 to 65 while the remaining part of the area is very low level of liquefaction potential (Figure 12b). It is clear from Figure 11b and Figure 12b that the same part of the Area_2 expresses greater level of liquefaction potential in terms of than the remaining part. This implies that although the LPI and L_s based liquefaction evaluation methods are different, they can still leads to similar liquefaction potential indication, hence, in a way validate each other.

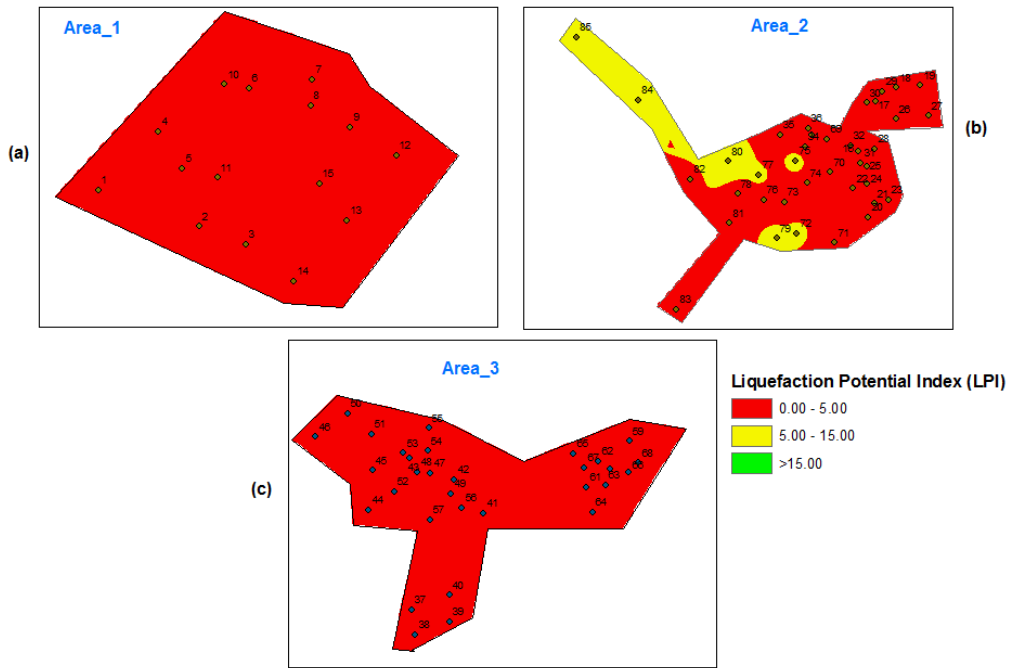


Figure 11. Liquefaction Potential Index (LPI) of the studied areas when 0.225g peak ground acceleration is considered

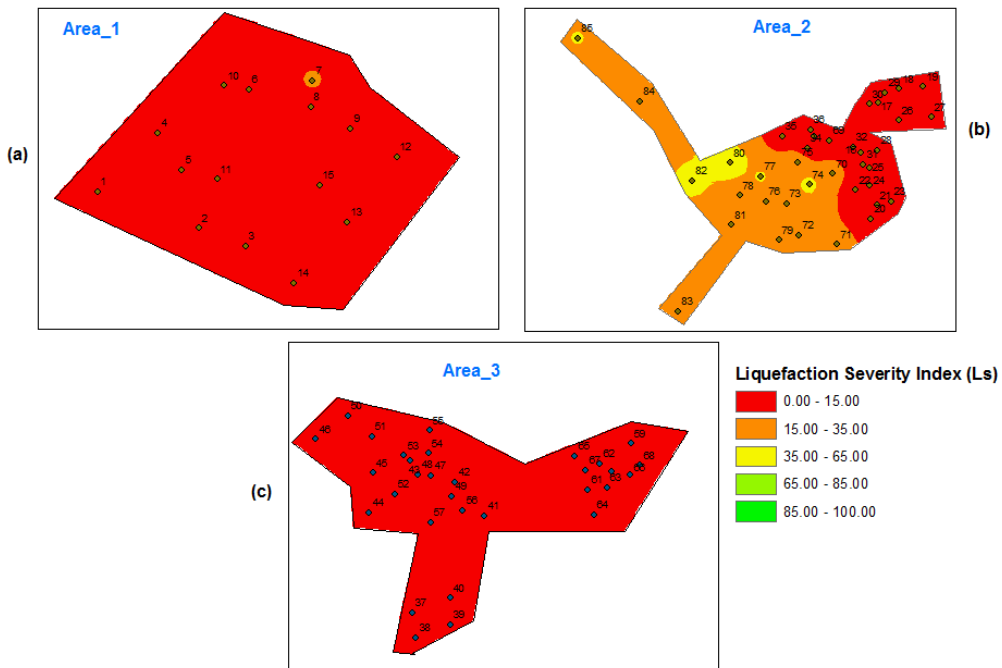


Figure 12. Liquefaction Severity Index (Ls) of the studied areas when 0.225g peak ground acceleration is considered

Table 5. Locations and liquefaction potentials at the boreholes in terms of LPI and LS values

Borehole_no	coordinates		LPI	Describ.	L _s	Describ.	LPI	Describ.	L _s	Describ.
	easting	northing								
BH-1	423135.1	4419672	4.67	Low	17.47	Low	0.00	Low	3.45	Very low
BH -2	423514.3	4419534	7.71	High	25.06	Low	0.36	Low	6.97	Very low
BH -3	423689.4	4419468	6.73	High	17.75	Low	0.64	Low	7.30	Very low
BH -4	423361.2	4419891	12.69	High	53.38	Moderate	1.65	Low	9.72	Very low
BH -5	423452.3	4419754	4.54	Low	7.16	Low	0.00	Low	3.90	Very low
BH -6	423701.5	4420054	8.40	High	35.72	Moderate	2.01	Low	8.96	Very low
BH -7	423941.5	4420087	16.50	Very high	43.01	Moderate	2.30	Low	16.49	Low
BH -8	423934.5	4419991	6.38	High	13.28	Very low	0.36	Low	6.97	Very low

Liquefaction Hazard Assessments in Igdir City (Türkiye)

BH -9	424082.5	4419909	4.19	Low	11.49	Very low	0.00	Low	3.47	Very low
BH -10	423611.3	4420069	5.22	High	16.99	Low	0.00	Low	4.88	Very low
BH -11	423583.3	4419719	6.30	High	19.62	Low	0.00	Low	5.43	Very low
BH -12	424256.6	4419802	7.04	High	28.69	Low	0.64	Low	7.30	Very low
BH -13	424071.5	4419556	6.79	High	14.82	Very low	0.08	Low	6.64	Very low
BH -14	423871.4	4419328	6.49	High	21.34	Low	0.36	Low	6.97	Very low
BH -15	423967.5	4419697	11.28	High	39.85	Moderate	1.48	Low	8.30	Very low
BH -16	420033.9	4417335	9.81	High	29.33	Low	0.00	Low	8.92	Very low
BH -17	420234	4417898	9.11	High	36.07	Moderate	0.64	Low	7.30	Very low
BH -18	420472.1	4418059	8.90	High	20.83	Low	4.07	Low	11.36	Very low
BH -19	420746.2	4418082	5.99	High	17.97	Low	0.00	Low	5.43	Very low
BH -20	420153	4416584	8.59	High	19.82	Low	0.00	Low	7.34	Very low
BH -21	420220	4416737	0.00	Low	11.93	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -22	419975.2	4416911	6.86	High	26.32	Low	1.20	Low	7.96	Very low
BH -23	420377.8	4416778	4.88	Low	7.55	Very low	0.00	Low	4.36	Very low
BH -24	420136	4416957	4.88	Low	12.16	Very low	0.00	Low	4.36	Very low
BH -25	420132.9	4417156	5.89	High	17.15	Low	0.00	Low	6.02	Very low
BH -26	420465.1	4417700	6.05	High	18.61	Low	0.00	Low	6.33	Very low
BH -27	420838.3	4417739	13.25	High	49.30	Moderate	0.64	Low	14.74	Very low
BH -28	420228	4417361	8.64	High	43.65	Moderate	0.64	Low	7.30	Very low
BH -29	420312	4418018	6.79	High	36.72	Moderate	0.00	Low	5.73	Very low
BH -30	420132	4417887	5.98	High	15.15	Low	0.00	Low	6.18	Very low
BH -31	420066	4417202	5.05	High	25.36	Low	0.00	Low	4.61	Very low
BH -32	419946.8	4417397	6.57	High	32.06	Low	0.00	Low	5.15	Very low
BH -33	419501.7	4417523	1.14	Low	15.06	Low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -34	419426.9	4417387	0.00	Low	4.13	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -35	419142.7	4417518	0.00	Low	7.38	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -36	419463.7	4417598	0.00	Low	2.82	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -37	414438.1	4422272	0.24	Low	16.02	Low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -38	414471.5	4422043	0.00	Low	12.56	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -39	414785.9	4422158	0.00	Low	11.60	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -40	414785.4	4422400	0.35	Low	9.76	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -41	415094	4423149	0.00	Low	3.11	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -42	414826.9	4423451	0.00	Low	4.41	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -43	414425.5	4423649	0.00	Low	9.52	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -44	414046.9	4423173	0.00	Low	4.77	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -45	414083	4423536	0.02	Low	9.95	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -46	413568.4	4423843	2.31	Low	17.28	Low	0.00	Low	1.42	Very low
BH -47	414611.8	4423512	0.00	Low	0.00	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -48	414491.5	4423519	0.00	Low	0.15	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -49	414801.9	4423327	0.00	Low	3.71	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -50	413855.6	4424058	0.00	Low	2.46	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -51	414073.3	4423864	0.00	Low	1.53	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -52	414281	4423344	0.00	Low	0.71	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -53	414364.6	4423695	0.00	Low	0.00	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -54	414587.7	4423714	0.00	Low	0.31	Very low	0.00	Low	0.00	Very low

BH -55	414598.8	4423922	0.00	Low	0.00	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -56	414899.2	4423194	0.00	Low	5.82	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -57	414605.1	4423086	0.00	Low	5.29	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -58	416304.5	424021.6	0.00	Low	1.13	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -59	416423.6	4423805	0.00	Low	5.00	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -60	416244.2	4423548	0.00	Low	1.66	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -61	416032.8	4423386	0.37	Low	5.11	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -62	416142	4423618	0.00	Low	3.91	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -63	416207.3	4423403	0.00	Low	3.64	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -64	416087.4	4423155	0.00	Low	6.66	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -65	415913.3	4423693	0.00	Low	12.00	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -66	416419.3	4423516	0.00	Low	1.55	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -67	416011.7	4423560	0.00	Low	3.53	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -68	416508	4423607	0.00	Low	0.00	Very low	0.00	Low	0.00	Very low
BH -69	419682.1	4417474	16.23	Very high	63.33	High	0.00	Low	10.19	Very low
BH -70	419719.9	4417094	28.98	Very high	75.00	High	1.50	Low	27.07	Low
BH -71	419767	4416291	20.26	Very high	74.01	High	2.36	Low	22.49	Low
BH -72	419333.3	4416396	29.43	Very high	63.54	Moderate	6.03	High	30.09	Low
BH -73	419191.7	4416756	25.10	Very high	77.03	High	1.22	Low	25.69	Low
BH -74	419450.2	4416972	37.97	Very high	86.03	Very high	4.95	Low	41.40	Moderate
BH -75	419324	4417227	30.25	Very high	68.28	High	8.31	High	32.54	Low
BH -76	418959.9	4416782	33.42	Very high	71.82	High	3.84	Low	33.89	Low
BH -77	418903.1	4417062	31.93	Very high	84.10	High	5.65	High	36.28	Moderate
BH -78	418661.5	4416847	27.34	Very high	70.38	High	2.56	Low	24.63	Low
BH -79	419105.6	4416342	23.92	Very high	72.44	High	6.16	High	25.90	Low
BH -80	418554.4	4417218	40.75	Very high	88.01	Very high	11.98	High	48.68	Moderate
BH -81	418567.4	4416515	27.59	Very high	78.56	High	3.21	Low	25.96	Low
BH -82	418124.3	4417014	33.12	Very high	82.24	High	4.18	Low	37.62	Moderate
BH -83	417962.2	4415532	21.49	Very high	74.68	High	2.34	Low	20.92	Low
BH -84	417531	4417914	17.78	Very high	51.66	Moderate	5.21	High	20.61	Low
BH -85	416822.7	4418631	31.58	Very high	81.63	High	7.05	High	35.14	moderate

7. Conclusions

This study deals with the liquefaction potentials of several districts, comprising Area_1, Area_2 and Area_3, in Iğdır city located in the eastern side of Türkiye. The city borders with three seismically active countries (i.e. Armenia, Nakhicivan and Iran) is located in a plain land and sits on Quaternary alluvial deposits, likewise the studied areas. Moreover, the site has been surrounded by several fault lines with potentially high magnitude earthquake triggering capabilities which may influence the city with as large as 0.393g and subsequently with 0.225g input motions. Due to these reasons, the study maps the liquefaction potential of the aforementioned areas within the city by considering soil data from 85 boreholes in total. The liquefaction potential is assessed at 0.393g and 0.225g seismic intensity levels with respect to two methods; (i) Liquefaction Potential Index (LPI) and (ii) Liquefaction Severity Index (L_s). The outcomes of the study can be listed as follows:

- Based on LPI and L_s criteria, the Area_1 located in the south-east side of the city is particularly prone to liquefaction as most part of the area is categorized by very high (LPI) and high (L_s) liquefaction probability under PGA of 0.393g.
- The Area_2 positioned on the north-west side of the city may also endure liquefaction effect with high to very high extents (LPI) or with low to high extents (L_s).

- Subsequently, in the south part of the city (Area_3), the liquefaction phenomena is expected to be recognized as very low by both LPI and L_s methods.
- As anticipated, when the city is hit by an input motion with PGA of 0.225g, liquefaction potential or severity stretch down to the lower categories. In particular, the Area_1 and the Area_3 are depicted to be non-liquefiable or very low liquefaction susceptibility. The Area_2 falls into, mostly, very low to low and, partially, high categories with respect to LPI criteria and low and very low (most proportion of the area) and moderate concerning L_s criteria.
- Finally, the studied areas at Igdir city are likely to persist liquefaction with varied degrees of severity. This study expresses the liquefaction potential at the city that may be benefitted for seismic risk mitigation, earthquake hazard assessments and urban planning policies.

Competing Interest

The authors declare that they do not have any competing interest.

Acknowledgement

The authors thanks to the Igdir Municipality for sharing the geotechnical data of the studied areas.

References

- [1] Kramer S. L. 1996. Geotechnical earthquake engineering. Pearson Education India
- [2] Cabalar A. F., Canbolat A., Akbulut N., Tercan S. H., Isik H. 2019. Soil liquefaction potential in Kahramanmaras, Türkiye. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, 10(1), 1822-38. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1629106>
- [3] Rouholamin M., Bhattacharya S., Orense R. P. 2017. Effect of initial relative density on the post-liquefaction behaviour of sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.02.007>
- [4] Yoshida N., Tokimatsu K., Yasuda S., Kokusho T., Okimura T. 2001. Geotechnical aspects of damage in Adapazari City during 1999 Kocaeli, Turkey earthquake. *Soils and Foundations*, 41(4), 25-45. https://doi.org/10.3208/sandf.41.4_25
- [5] Allen J., Bradley B., Green R., Orense R., Wotherspoon L., Ashford S., et al. 2010. Geotechnical reconnaissance of the 2010 Darfield (Canterbury) earthquake. *Bulletin of New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 43(4), 243. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.43.4.243-320>
- [6] Papathanassiou G., Mantovani A., Tarabusi G., Rapti D., Caputo R. 2015. Assessment of liquefaction potential for two liquefaction prone areas considering the May 20, 2012 Emilia (Italy) earthquake. *Journal of Environmental Earth Sciences*, 189, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.02.002>
- [7] Yasuda S. 2014. Allowable Settlement and Inclination of Houses Defined After the 2011 Tohoku: Pacific Ocean Earthquake in Japan. *Geotechnical Geological and Earthquake Engineering*, 28, 141-57. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03182-8_5
- [8] Sassa S., Takagawa T. 2019. Liquefied gravity flow-induced tsunamis: first evidence and comparison from the 2018 Indonesia Sulawesi earthquake and tsunami disasters. *Landslides*, 16(1), 195-200. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1114-x>
- [9] Cakir, E., Cetin, K. O. 2024. Liquefaction triggering and induced ground deformations at a metallurgical facility in Dörtöyl-Hatay after the February 6 Kahramanmaraş earthquake sequence. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 178, 108465. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108465>
- [10] Ozener, P., Monkul, M. M., Bayat, E. E., Ari, A., Cetin, K. O. 2024. Liquefaction and performance of foundation systems in Iskenderun during 2023 Kahramanmaras-Turkiye earthquake sequence. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 178, 108433. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108433>
- [11] Yilmaz C., Silva V., Weatherill G. 2021. Probabilistic framework for regional loss assessment due to earthquake-induced liquefaction including epistemic uncertainty. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141, 106493. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106493>
- [12] Zhang W., Lim K. W., Ghahari S. F., Arduino P., Tacioglu E. 2021. On the implementation and validation of a three-dimensional pressure-dependent bounding surface plasticity model for soil nonlinear wave propagation and soil-structure interaction analyses. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 45(8), 1091-119. <https://doi.org/10.1002/nag.3194>

- [13] Kiyota T., Koseki J., Sato T., Tsutsumi Y. 2009. Effects of sample disturbance on small strain characteristics and liquefaction properties of holocene and pleistocene sandy soils. *Soils and Foundations*, 49(4), 509-23. [https://doi.org/ 10.3208/sandf.49.509](https://doi.org/10.3208/sandf.49.509)
- [14] Kiyota T., Maekawa Y., Wu C. 2019. Using in-situ and laboratory-measured shear wave velocities to evaluate the influence of soil fabric on in-situ liquefaction resistance. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117, 164-73. [https://doi.org/ 10.1016/j.soildyn.2018.11.016](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.11.016)
- [15] Lees J. J., Ballagh R. H., Orense R. P., van Ballegooy S. 2015. CPT-based analysis of liquefaction and re-liquefaction following the Canterbury earthquake sequence. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, 304-314. [https://doi.org/ 10.1016/j.soildyn.2015.02.004](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.02.004)
- [16] Facciorusso J., Madiati C., Vannucchi G. 2015. CPT-Based Liquefaction Case History from the 2012 Emilia Earthquake in Italy. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(12). [https://doi.org/ 10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001349](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001349)
- [17] Chern S. G., Lee C. Y. 2009. CPT-based simplified liquefaction assessment by using fuzzy-neural network. *Journal of Marine Science and Technology-Taiwan*, 17(4), 326-31. [https://doi.org/ 10.51400/2709-6998.2024](https://doi.org/10.51400/2709-6998.2024)
- [18] Seed H. B., Idriss I. M. 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 97(SM9), 1249-73. [https://doi.org/ 10.1061/JSFEAQ.0001662](https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001662)
- [19] Youd T. L., Idriss I. M., Andrus R. D., Arango I., Castro G., Chritrian J., et al. 2001. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10), 817-33. [https://doi.org/ 10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:10\(817\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(817))
- [20] Cetin K. O., Seed H. B., Der Kiureghian A., Tokimatsu K., Harder L., Kayen R., et al. 2004. SPT-Based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(12), 1314-40. [https://doi.org/ 10.1016/j.dib.2018.08.043](https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.08.043)
- [21] Duman, E. S., Ikizler, S. B., & Angin, Z. E. K. A. I. (2015). Evaluation of soil liquefaction potential index based on SPT data in the Erzincan, Eastern Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 5269-5283. [https://doi.org/ 10.1007/s12517-014-1550-4](https://doi.org/10.1007/s12517-014-1550-4)
- [22] Yıldız, Ö. (2022). Seismic site characterization of Battalgazi in Malatya, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9), 867. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10170-x>
- [23] Akkaya, İ., Özvan, A., Akin, M., Akin, M. K., & Övün, U. (2018). Comparison of SPT and V s-based liquefaction analyses: a case study in Erciş (Van, Turkey). *Acta Geophysica*, 66, 21-38. <https://doi.org/10.1007/s11600-017-0103-0>
- [24] Avagyan, A., Sosson, M., Sahakyan, L., Sheremet, Y., Vardanyan, S., Martirosyan, M., Muller, C., 2018. Tectonic Evolution of the Northern Margin of the Cenozoic Ararat Basin, Lesser Caucasus, Armenia. *J Petr. Geol.* 41(4):495-511. [https://doi.org/ 10.1111/jpg.12718](https://doi.org/10.1111/jpg.12718)
- [25] Türkiye İstatistik Kurumu İl ve ilçelere göre il/ilçe merkezi, belde/köy nüfusu ve yıllık nüfus artış hızı, [online] Available at: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=nufus-ve-demografi-109&dil=1> [Accessed: 17.05.2023]
- [26] Karaoğlu M., Erdel E. 2022. A Study of Soil and Land Features with Geographic Information Systems (GIS) Analysis: İğdir, Türkiye. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 9(2), 198-208. [https://doi.org/ 10.19159/tutad.1076908](https://doi.org/10.19159/tutad.1076908)
- [27] Koç A., Koç C. 2018. An Assessment through relationship between air pollution and climatic parameters in City of İğdir. *Journal of Urban Cultures and Managements*, 11(1), 1-10.
- [28] Öztürk M., Altay V., Altundağ E., Gücel S. 2016. Halophytic plant diversity of unique habitats in Turkey: Salt mine caves of Çankırı and İğdir. *Halophytes for food security in dry lands*, Elsevier, 291-315.
- [29] Bulut F., Bohnhoff M., Eken T., Janssen C., Kilic T., Dresen G. 2012. The East Anatolian Fault Zone: Seismotectonic setting and spatiotemporal characteristics of seismicity based on precise earthquake locations. *Journal of Geophysics Research-Solid Earth*, 117. [https://doi.org/ 10.1029/2011jb008966](https://doi.org/10.1029/2011jb008966)
- [30] Yavasoglu H., Tari E., Tuysuz O., Cakir Z., Ergintav S. 2011. Determining and modeling tectonic movements along the central part of the North Anatolian Fault (Turkey) using geodetic measurements. *Journal of Geodynamics*, 51(5), 339-43. [https://doi.org/ 10.1016/j.jog.2010.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jog.2010.07.003)
- [31] Ministry of Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD). <http://www.deprem.gov.tr/en/event-catalogue> (accessed at 12 December 2023).
- [32] Emre Ö., Duman T. Y., Özalp S., Şaroğlu F., Olgun Ş., Elmacı H., et al. 2018. Active fault database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3229-75. [https://doi.org/ 10.1007/s10518-016-0041-2](https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2)
- [33] Karakhanian A. S., Trifonov V. G., Philip H., Avagyan A., Hessami K., Jamali F., et al. 2004. Active faulting and natural hazards in Armenia, eastern Turkey and northwestern Iran. *Tectonophysics*, 380(3-4), 189-219. [https://doi.org/ 10.1016/j.tecto.2003.09.020](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.020)
- [34] Wells D. L., Coppersmith K. J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974-1002. [https://doi.org/ 10.1785/BSSA0840040974](https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974)

- [35] Ulusay R., Tuncay E., Sonmez H., Gokceoglu C. 2004. An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey. *Engineering Geology*, 74(3-4), 265-91. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.04.002>
- [36] Guzel, Y. 2024. Correlating Measured SPT-N, Shear Wave Velocity and Liquid Limit Values in Melekli Region, Iğdır (Türkiye). *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 10(1), 161-174. <https://doi.org/10.28979/jarnas.1393352>
- [37] Seed H. B., Idriss I. M. 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 97(9), 1249-73.
- [38] Seed H. B., Tokimatsu K., Harder L. F., Chung R. M. 1985. Influence of spt procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering-ASCE*, 111(12), 1425-45.
- [39] Liao S. S. C., Whitman R. V. 1986. Overburden correction factors for spt in sand. *Journal of Geotechnical Engineering-ASCE*, 112(3), 373-7. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1986\)112:3\(373\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1986)112:3(373))
- [40] Akin M. K., Kramer S. L., Topal T. 2016. Dynamic soil characterization and site response estimation for Erbaa, Tokat (Turkey). *Natural Hazards*, 82(3), 1833-68. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2274-4>
- [41] Seed R. B., Cetin K. O., Moss R. E., Kammerer A. M., Wu J., Pestana J. M., et al. 2003. Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. *Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar: Long Beach, CA*.
- [42] Sonmez H. 2003. Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegöl, Turkey). *Environmental Geology*, 44(7), 862-71. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0831-0>
- [43] Tosun H., Ulusay R. 1997. Engineering geological characterization and evaluation of liquefaction susceptibility of foundation soils at a dam site, southwest Turkey. *Environmental and Engineering Geosciences*, 3(3), 389-409. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.III.3.389>
- [44] Ulusay R., Kuru T. 2004. 1998 Adana-Ceyhan (Turkey) earthquake and a preliminary microzonation based on liquefaction potential for Ceyhan town. *Natural Hazards*, 32(1), 59-88. <https://doi.org/10.1023/b:Nhaz.0000026790.71304.32>
- [45] Duman E. S., Ikizler S. B., Angin Z. 2015. Evaluation of soil liquefaction potential index based on SPT data in the Erzincan, Eastern Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(7), 5269-83. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1550-4>
- [46] Seed H. B., Idriss I. 1982. *Ground motion and soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California.
- [47] Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka F., Watanabe S., Yasuda S., Sato H. 1981. Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. *Proceedings of the 3rd international conference on microzonation, Seattle*, pp. 1310-30.
- [48] Sonmez H., Gokceoglu C. 2005. A liquefaction severity index suggested for engineering practice. *Environmental Geology*, 48(1), 81-91. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1263-9>