Black Sea Journal of Engineering and Science

Volume 8 | Issue 3



ISSN: 2619 - 8991

BS Journals

BLACK SEA JOURNAL OF ENGINEERING AND SCIENCE

(BSJ ENGIN SCI)

Black Sea Journal of Engineering and Science (BSJ Eng Sci) is a double-blind peer-reviewed, open-access international journal published electronically 6 times (January, March, May, July, September, and November) in a year by since January 2018. It publishes, in English and Turkish, full-length original research articles, innovative papers, conference papers, reviews, mini-reviews, rapid communications or technical note on advances in a wide range of scientific disciplines from all fields of engineering and science and from any source.

ISSN 2619 - 8991

Phone: +90 362 408 25 15

Fax: +90 362 408 25 15

Email: bsjsci@blackseapublishers.com

Web site: http://dergipark.gov.tr/bsengineering

Sort of publication: Periodically 6 times (January, March, May, July, September, and November) in a year

Publication date and place: May 15, 2025 - Samsun, TÜRKİYE

Publishing kind: Electronically

OWNER

Prof. Dr. Uğur ŞEN

DIRECTOR IN CHARGE

Prof. Dr. Hasan ÖNDER

EDITOR BOARDS

EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. Uğur ŞEN, Ondokuz, Mayis University, TÜRKİYE

Prof. Dr. Hasan ÖNDER, Ondokuz Mayis University, TÜRKİYE

SECTION EDITORS*

Prof. Dr. Berna KILIÇ, Section Editor of Fisheries Engineering, Ege University, TÜRKİYE

Prof. Dr. Bülent YANIKTEPE, Section Editor of Aerospace Engineering, Osmaniye Korkut Ata University, TÜRKİYE

Prof. Dr. Çiğdem TAKMA, Section Editor of Statistics, Ege University, TÜRKİYE

Prof. Dr. Dilek KUT, Section Editor of Textile Engineering, Uludağ University, TÜRKİYE

Prof. Dr. Erkan YALÇIN, Section Editor of Biology, Ondokuz Mayıs University, TÜRKİYE

Prof. Dr. Ertan BUYRUK, Section Editor of Mechanical Engineering, Sivas Cumhuriyet University, TÜRKİYE

Prof. Dr. Esteban TLELO-CUAUTLE, Section Editor of Electrical and Electronics Engineering, National Institute of Astrophysics, Optics and Electronics, MEXICO

Prof. Dr. Fauziatul FAJAROH, Section Editor of Chemical Engineering, Universitas Negeri Malang, INDONESIA

Prof. Dr. Gökhan CİVELEKOĞLU, Section Editor of Environmental Engineering, Akdeniz University, TÜRKİYE

Prof. Dr. Hasan TANAK, Section Editor of Physics, Amasya University, TÜRKİYE

Prof. Dr. Hasan TEMİZ, Section Editor of Food Engineering, Ondokuz Mayis University, TÜRKİYE

Prof. Dr. Hojjat SADEGHİ-ALİABADİ, Section Editor of Chemistry, Isfahan University, IRAN

Prof. Dr. Hüseyin PEKER, Section Editor of Forest Engineering, Artvin Çoruh University, TÜRKİYE

Prof. Dr. İbrahim Özgür DENEME, Section Editor of Civil Engineering, Aksaray University, TÜRKİYE

Prof. Dr. Nilüfer YURTAY, Section Editor of Computer Engineering, Sakarya University, TÜRKİYE

Prof. Dr. Özgür Hakan AYDOĞMUŞ, Section Editor of Mathematics, Social Sciences University of Ankara, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Belgin KARABACAKOĞLU, Section Editor of Chemical Engineering, Eskişehir Osmangazi University, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Edit MİKÓ, Section Editor of Agricultural Engineering, University of Szeged, HUNGARY

Assoc. Prof. Dr. Ergün EKİCİ, Section Editor of Industrial Engineering, Çanakkale Onsekiz Mart University, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Helal Uddin MOLLA, Section Editor of Physics, Rajshahi University of Engineering and Technology, BANGLADESH

Assoc. Prof. Dr. Kadyrbay CHEKİROV, Section Editor of Biology, Kyrgyz Turkish Manas University, KYRGYZSTAN

Assoc. Prof. Dr. Lukman ABDULRA'UF, Section Editor of Chemistry, Kwara State University, NIGERIA
Assoc. Prof. Dr. Mehmet EBEOĞLUGİL, Dokuz Eylül University, TÜRKİYE
Assoc. Prof. Dr. Mohammad KHAJEH MEHRIZI, Section Editor of Textile Engineering, Yazd University, IRAN
Assoc. Prof. Dr. Silvio DE OLİVEİRA JUNIOR, Section Editor of Mechanical Engineering, University of São Paulo, BRAZIL
Assoc. Prof. Dr. Sinan AKISKA, Section Editor of Geological Engineering, Ankara University, TÜRKİYE
Assoc. Prof. Dr. Ufuk Atmaca, Section Editor of Chemistry, Atatürk University, TÜRKİYE
Assoc. Prof. Dr. Veli İLÇİ, Section Editor of Geomatics Engineering, Ondokuz Mayis University, TÜRKİYE
Asst. Prof. Dr. Francis INEGBEDİON, Section Editor of Industrial Engineering, University of Benin, NIGERIA
Asst. Prof. Dr. Jun-wei LİM, Section Editor of Environmental Engineering, Universiti Teknologi Petronas, MALAYSIA
Asst. Prof. Dr. Mehmet ÖZDEMİR, Section Editor of Mining Engineering, Kütahya Dumlupınar University, TÜRKİYE
Asst. Prof. Dr. Muhammad GULİSTAN, Section Editor of Mathematics, Hazara University, PAKISTAN
Asst. Prof. Dr. Sedat KARADAVUT, Section Editor of Agricultural Engineering, Trakya University, TÜRKİYE
Asst. Prof. Ranjith RAJ A, Section Editor of Metallurgical and Materials Engineering, Sri Venkateswara College of Engineering, INDIA

* The ranking is arranged alphabetically within the academic title

STATISTIC EDITOR
Prof. Dr. Mehmet TOPAL, Kastamonu University, TÜRKİYE

ENGLISH EDITOR
Asst. Prof. Dr. Betül ÖZCAN DOST, Ondokuz Mayis University, TÜRKİYE

TURKISH EDITOR
Prof. Dr. Serkan ŞEN, Ondokuz Mayis University, TÜRKİYE

REVIEWERS OF THE ISSUE*

Prof. Dr. Adnan ÜNALAN, Niğde Ömer Halisdemir University, Department of Biostatistics and Medical Informatics, Biostatistics, TÜRKİYE

Prof. Dr. Ahmet KABUL, Isparta University of Applied Science, Mechanical Engineering Department, Engineering Economy, TÜRKİYE

Prof. Dr. Arzuhan Burcu GÜLTEKİN, Gazi University, Department of Architecture, Architecture, TÜRKİYE

Prof. Dr. Cenk ÇELİK, Kocaeli University, Department of Mechanical Engineering, Renewable Energy Resources, TÜRKİYE

Prof. Dr. Mehmet Emin ARSLAN, Düzce University, Department of Civil Engineering, Structural Engineering, TÜRKİYE

Prof. Dr. Emine CAN, Istanbul Medeniyet University, Department of Physics Engineering, Fuzzy Computation, TÜRKİYE

Prof. Dr. Ergun ERASLAN, Yıldırım Beyazıt University, Department of Industrial Engineering, Fuzzy Computation, TÜRKİYE

Prof. Dr. İbrahim Ender MÜLAZIMOGLU, Necmettin Erbakan University, Department of Mathematics and Science Education, Analytical Chemistry, TÜRKİYE

Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN, Dokuz Eylül University, Department of Chemistry, Analytical Chemistry, TÜRKİYE

Prof. Dr. Mehmet GÖNEN, Süleyman Demirel University, Department of Chemical Engineering, Chemical Process Design, TÜRKİYE

Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ, Gazi University, Department of Energy Systems Engineering, Thermal Power Systems, TÜRKİYE

Prof. Dr. Recep KÜLCÜ, Isparta Applied Science University, Department of Agricultural Machinery and Technologies Engineering, Agricultural Machines, TÜRKİYE

Prof. Dr. Reyhan KARA GÜLBAY, Karadeniz Technical University, Department of Geological Engineering, Geological Sciences and Engineering, TÜRKİYE

Prof. Dr. Selahattin YAVUZ, Erzincan Binali Yıldırım University, Department of Administrative Sciences, Statistical Analysis, TÜRKİYE

Prof. Dr. Sinan APAK, Fenerbahce University, Department of Industrial Engineering, Multiple Criteria Decision Making, TÜRKİYE

Prof. Dr. Tuncay BAYRAM, Karadeniz Technical University, Department of Physics, Nuclear Physics, TÜRKİYE

Prof. Dr. Turgut ÖZSEVEN, Tokat Gaziosmanpaşa University, Department of Computer Engineering, Information and Computing Sciences, TÜRKİYE

Prof. Dr. Ümit ÖZER, Istanbul University - Cerrahpasa, Department of Mining Engineering, Mining Engineering, TÜRKİYE

Prof. Dr. Zafer ÜSTÜNDAĞ, Kütahya Dumlupınar University, Department of Chemistry, Electroanalytical Chemistry, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Ayben TOP, İzmir Institute of Technology, Department of Chemical Engineering, Chemical Engineering, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Canan CiMŞİT, Kocaeli University, Golcuk Vocational School, Mechanical Engineering, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Ercan AYDOĞMUŞ, Fırat University, Department of Chemical Engineering, Materials Science and Technologies, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Hamid Asadi DERESHGI, Istanbul Arel University, Department of Biomedical Engineering, Dynamics, Vibration and Vibration Control, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Kemal Çağatay SELVİ, Ondokuz Mayıs University, Department of Agricultural Machinery and Technologies Engineering, Agricultural Machines, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Merve TUNA KAYILI, Karabük University, Department of Architecture, Architecture, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Metin USTA, Hatay Mustafa Kemal University, Department of Physics, Nuclear Physics, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Nimet BÖLGEN KARAGÜLLE, Mersin University, Department of Chemical Engineering, Energy Systems Engineering, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Nuray ÇELEBİ, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Energy Systems Engineering, Energy Systems Engineering, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Oğuz ÖZBEK, Tokat Gaziosmanpaşa University, Department of Molecular Biology and Genetics, Analytical Chemistry, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Ömer Faruk COŞKUN, Hatay Mustafa Kemal University, Department of Horticulture, Horticultural Production, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Ömer KASAR, Karadeniz Technical University, Department of Electronics and Communication Engineering, Engineering Electromagnetics, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Selman ULUIŞIK, Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Department of Plant and Animal Production, Food Sciences, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Semin TOPALOĞLU PAKSOY, Çukurova University, Department of Econometrics, Econometric and Statistical Methods, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Seracettin ARASAN, Ataturk University, Department of Civil Engineering, Civil Geotechnical Engineering, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Sevilay DEMİRKESEN, Gebze Technical University, Department of Civil Engineering, Project and Production Management, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Seyfullah GÖKOĞLU, Bartın University, Department of Computer Technology and Information Systems, Virtual and Mixed Reality, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Tamer DİRİKGİL, Erciyes University, Department of Civil Engineering, Structural Engineering, TÜRKİYE

Assoc. Prof. Dr. Tolga DEMİRCAN, Kırıkkale University, Department of Mechanical Engineering, Mechanical Engineering, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Ahmet İsmail ÖZKAN, Artvin Çoruh University, Medicinal-Aromatic Plants Application and Research Center, Microbiology, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Aslı ÖZTÜRK, Çankırı Karatekin University, Department of Office Services and Secretarial, Strategy, Management and Organizational Behaviour, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Bahadır ŞENGÜN, Sivas Cumhuriyet University, Department of Civil Engineering, Mining Engineering, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Barış Gürcan HAKANOĞLU, Atılım University, Department of Electrical-Electronics Engineering, Engineering Electromagnetics, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Betül KAFKASLIOĞLU YILDIZ, Sivas University of Science and Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Materials Science and Technologies, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Cemil KÖZKURT, Bandırma Onyedi Eylül University, Department of Transportation Engineering, Mechatronics Engineering, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Engin BAYSOY, Bahçeşehir University, Department of Biomedical Engineering, Biomedical Diagnosis, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Ensar Arif SAĞBAŞ, Muğla Sıtkı Koçman University, Department of Information Systems Engineering, Satisfiability and Optimisation, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Erdem ŞAHİN, Muğla Sıtkı Koçman University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Additive Manufacturing, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Ertuğrul KARAKAPLAN, Pamukkale University, Department of Mining and Extraction, Mine Design, Management and Economy, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Fatih DEMİR, Erzincan Binali Yıldırım University, Department of Mechanical Engineering, Thermodynamics and Statistical Physics, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Gürkan AYDEMİR, Bursa Technical University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Deep Learning, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Hasan Aykut KARABOĞA, Amasya University, Department of Educational Science, Data Mining and Knowledge Discovery, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Hilal KUDAY, İstanbul Yeni Yüzyıl University, Department of Pharmacy, Organic Chemistry, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. İbrahim ÇAVUŞOĞLU, Gümüşhane University, Department of Mining Engineering, Mining Engineering, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. İbrahim Halil DEGER, Hasan Kalyoncu University, Department of Civil Engineering, Fluid Mechanics and Thermal Engineering, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Kayhan DAĞIDIR, Tarsus University, Department of Mechanical Engineering, Mechanical Engineering, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Kemal DAVUT, İzmir Yüksek Teknoloji Institute, Department of Materials Science and Engineering, Materials Engineering, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Meral KORKMAZ, Munzur University, Department of Civil Engineering, Hydroelectric Energy Systems, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Miyase YAYLAGÜL, Aksaray University, Department of Medical Services and Techniques, Plant Biotechnology, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Muhammet Anıl KAYA, Giresun University, Department of Mechanical Engineering, Material Design and Behaviors, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Muhammed Talha NARCI, Istanbul Aydin University, Department of Management Information Systems, Environmental Engineering, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Neslihan ÜNAL KARTAL, Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Department of Land Registry and Cadastre, Mineral Stratum and Geochemistry, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Olcay ALTINTAŞ, İskenderun Technical University, Department of Electrical-Electronics Engineering, Engineering Electromagnetics, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Pınar ÇELEBİ DEMİRARSLAN, Bartın University, Department of Business Administration, Multiple Criteria Decision Making, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Reyhan ZENGİN, İnönü University, Department of Biomedical Engineering, Artificial Intelligence, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Selden ÇEPNİ, Işık University, Department of Biomedical Engineering, Renewable Energy Resources, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Vahtettin Cem BAYDOĞAN, Fırat University, Department of Software Engineering, Artificial Learning, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Veysi KARTAL, Siirt University, Department of Civil Engineering, Water Resources Engineering, TÜRKİYE

Assist. Prof. Dr. Yusuf Alparslan ARGUN, Karamanoğlu Mehmetbey University, Kazım Karabekir Vocational School, Environmental Engineering, TÜRKİYE

Dr. Abdulhamit SEVGİ, OSTIM Technical University, Department of Electronics and Automation, Artificial Intelligence, TÜRKİYE

Dr. Burak Kürşat GÜL, Erciyes University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Electronics, TÜRKİYE

Dr. Cihan SEZER, İstanbul Aydin University, Department of Mechanical Engineering, Thermodynamics and Statistical Physics, TÜRKİYE

Dr. Emine Özlem DENGİZ, Samsun University, Gas and Plumbing Technology Program, Material Design and Behaviors, TÜRKİYE

Dr. Enes GÜNALTILI, Necmettin Erbakan University, Department of Mechanical Engineering, Energy Systems Engineering, TÜRKİYE

Dr. Ezgi GÜRGENÇ, Fırat University, Department of Energy Systems Engineering, Energy Systems Engineering, TÜRKİYE

Dr. Gözde KABAY, Karlsruhe Institute of Technology, Department of Bioengineering and Biosystems, Biomedical Diagnosis, GERMANY

Dr. Gülay TEZEL, Konya Technical University, Department of Computer Engineering, Artificial Intelligence, TÜRKİYE

Dr. Gülşah KARATAŞ, Tokat Gaziosman Paşa University, Department of Food Engineering, Food Engineering, TÜRKİYE

Dr. Hakan ERDURAN, Bahri Dağdaş International Agricultural Research Institute, Dairy Technology, TÜRKİYE

Dr. Hilal AKARKAMÇI, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Computer İngineering, Deep Learning, TÜRKİYE

Dr. İbrahim Arda CANKAYA, Suleyman Demirel University, Department of Computer Engineering, Deep Learning, TÜRKİYE

Dr. Kerim ÖZKARA, Sinop University, Department of Electronics and Automation, Biomedical Engineering, TÜRKİYE

Dr. Lakshmanan KASI, Anna University, Department of Mechanical Engineering, Energy Nanomaterials, INDIA

Dr. Mark ALEGBE, Auchi Polytechnic University, Department of Architectural Technology, Sustainable Architecture, NIGERIA

Dr. Mert ONAN, Yıldız Kalıp Company, Research and Development Centre, Materials Science and Technologies, TÜRKİYE

Dr. Muhammed MAHMUDI, Ege University, Department of Civil Engineering, Geotechnical Engineering, TÜRKİYE

* The ranking is arranged alphabetically within the academic title

Volume 8, Issue 3 (2025)

Table of Contents

Research Articles

1. CHANGE OF dmax VALUES OF ELEMENTS WITH Z≤54 FOR ELECTRON BEAMS
Zeynep YÜKSEL.....569-571

2. MANUEL, YARI OTOMATİK VE MOBİL ROBOT TABANLI OTONOM TOPRAK BURGU MAKİNELERİNİN ALAN KAPASİTELERİNİN KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRİLMESİ
Osman ECEOĞLU, İlker ÜNAL.....572-578

3. THE EFFECT OF CURD COOKING TEMPERATURE AND TIME ON CHEMICAL AND MELTING PROPERTIES IN CHEESE PRODUCED WITH THE TRADITIONAL METHOD
Esen Bilge BİÇER, Nursel DEVELİ IŞIKLI.....579-590

4. OPTIMISING 3D PRINT PARAMETERS FOR L-JOINT STRENGTH USING TAGUCHI METHOD
Aleyna TAŞKIN, Cengiz Görkem DENGİZ.....591-597

5. BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) ON HYDRAULIC ENERGY
Zeyneb KILIÇ.....598-604

6. KÖMÜRÜN UZAKTAN ALGILAMA (UA) YÖNTEMLERİ VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ (CBS) ARAÇLARINDA KULLANIMININ BİBLİYOMETRİK ANALİZE DAYALI İNCELENMESİ
Cevdet Bertan GÜLLÜDAĞ.....605-615

7. DETERMINATION OF CRITICAL VARIABLES FOR RESILIENT URBANIZATION
Mahmut Esat ÇAKMAK, Esra DOBRUCALI.....616-626

8. KALP RİTİM BOZUKLUKLARININ ÇOK SINIFLI SINIFLANDIRILMASINDA RELİEFF YÖNTEMİ VE MAKİNE ÖĞRENİMİ TABANLI YAKLAŞIM
Çiğdem Gülüzar ALTINTOP.....627-641

9. SANAL GERÇEKLİK TEKNOLOJİSİ İLE BİR MÜZE TURU UYGULAMASI TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ
Doğan YILDIZ, Samad HASANLI, Sercan DEMİRCİ.....642-649

10. IDENTIFICATION AND SIMULATION OF FIRE AND EXPLOSION HAZARDS USING HAZOP AND ALOHA, CASE STUDY: THE IGNITION SYSTEM OF A POWER PLANT
Nafiseh FARAJIRAD, Müge ENSARİ ÖZAY.....650-659

11. BÜTÜNLEŞİK AHP VE K-ORTALAMA KÜMELEME TABANLI YEDEK PARÇA TALEP TAHMİNİ: SAĞLIK EKİPMANLARI ALANINDA BİR UYGULAMA
Doğukan İlbey SÜSLÜ, Kumru Didem ATALAY, Tusan DERYA.....660-671

12. DESIGN OF A CHAOTIC SPEED-CONTROLLED MIXING DEVICE AND EFFICIENCY ANALYSIS IN BIOGAS
Muhammed Salih SARIKAYA, Mert Süleyman DEMİRSOY, Mustafa Çağrı KUTLU.....672-679

13. YAPAY ZEKÂ UYGULAMALARININ İŞ SÜREÇLERİNE KATKISI
Songül DEMİRKAN.....680-694

14. ŞİZOFREN HASTALARININ TESPİTİNDE YAPAY ZEKA TABANLI PERFORMANS ANALİZİ
Ali NARİN, Burhan SEZEN.....695-703

15. AĞIZ İÇİ GÖRÜNTÜLERİN DERİN ÖĞRENME İLE ANALİZİ: CNN MODELLERİNİN SINIFLANDIRMA PERFORMANSI
Sena ÇELİK……..704-714
16. IN SILICO EXPLORATION OF PLANT EXTRACTS AS ACHE INHIBITORS: INSIGHTS FROM MOLECULAR DYNAMICS AND MM/GBSA ANALYSIS FOR ALZHEIMER'S DRUG DEVELOPMENT
Barış KURT, Murat EVCİL, Ayşe BARAN……715-728
17. PATLATMALI KAZI ÇALIŞMALARINDA TİTREŞİM YAYILIM EŞİTLİKLERİNİN SAHA ÖLÇÜMLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI, BİR İNŞAAT PROJESİ ÖRNEĞİ
Tuğçe ÖNGEN……729-737
18. DESIGN AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF A HYDRAULIC MOBILE ELEVATING WORK PLATFORM
Oğuz GUNEY, Omer Bugra SEYMEN, Tolga GÜNEY, Sinan DUZENLI, Mucahit SOYASLAN……738-746
19. PERFORMANCE EVALUATION OF G7 COUNTRIES IN TERMS OF PATENT APPLICATIONS
Sinan DÜNDAR……747-756
20. TECHNOLOGICAL ADVANCES IN AEC: AI, MACHINE LEARNING, BIM, AND THE FUTURE OF SUSTAINABLE BUILDING DESIGN IN A POST-PANDEMIC WORLD
Aslıhan ŞENEL SOLMAZ……757-774
21. THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ETHYL VINYL ACETATE (EVA) / NANO-CLAYS OR SLAKED LIME COMPOSITES
İlker ERDEM, Şeyma AVCI……775-783
22. MECHANICAL STABILIZATION OF GRANULAR SOILS WITH CHICKEN FEATHER FIBER WASTE
Mitat ÖZTÜRK, Uğur Eren YURTCAN……784-792
23. CAM ELYAF/POLİPROPİLEN MELEZ İPLİKLERİNDEN ELYAF SARMA YÖNTEMİYLE KOMPOZİT BORU ÜRETİMİ
Aylin ALTINBAY, Mustafa DOĞU, Ahmet ÜNAL……793-798
24. SİVİL HAVACILIK SEKTÖRÜNDE EMİSYON HESAPLAMA YÖNTEM VE YÖNETİMİ: TRABZON, RİZE-ARTVİN VE ORDU-GİRESUN HAVALİMANLARI ÖRNEĞİ
Fatih KARAMAN……799-813
25. THERMODYNAMIC AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE ANALYSIS OF THE MARIB INTEGRATED POWER AND COOLING CYCLE
Abdulrazzak AKROOT……814-823
26. A COST-EFFECTIVE WIDE-BAND ANTENNA FOR 5G COMMUNICATION SYSTEMS
Gürkan KALINAY, İremnur DURU, Timuçin Emre TABARU, Fatih KABURCUK……824-830
27. ANTIBAKTERIYEL VE AKUSTIK PERFORMANSLI KENEVIR ESASLI STETOSKOP DIYAFRAM MALZEMESI GELIŞTIRILMESI
Tuğba MUTUK, Selim ARAS, Şevval EREN, Ahmet Anıl TÜMER……831-836
28. THERMODYNAMIC AND STRUCTURAL PROPERTIES OF BIOMIMETIC MONOLAYERS CONTAINING CHOLESTEROL AND MAGNETITE NANOPARTICLES
Nagihan SOYER, Sema SALGIN, Uğur SALGIN……837-845

29. TÜRKİYE'DE KAMU OKUL VE HASTANE İNŞAATI PROJELERİNDE FARKLI ÖN MALİYET TAHMİN YÖNTEMLERİNİN PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI: GÜNEY MARMARA BÖLGESİ ÖRNEĞİ

Latif Onur UĞUR.....846-854

30. BİR ELEKTRİKLİ ARAÇ LİTYUM İYON BATARYASININ DOĞAL TAŞINIM ŞARTLARINDA SOĞUTULMASININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Muhittin BİLGİLİ, Yunus Emre GÖNÜLAÇAR, Emre Aşkın ELİBOL.....855-862

31. COMPARISON OF IN VITRO AND HYDROPONIC SCREENING METHODS FOR NITROGEN EFFICIENCY IN PEPPER (CAPSICUM ANNUUM L.)

Alim AYDIN, Hasan PINAR, Firdes ULAS, Halit YETISIR, Mirac SAHIN, Hamide AYDIN....863-874

32. PERFORMANCE EVALUATION OF SUPERVISED MACHINE LEARNING CLASSIFIERS FOR TYPE 2 DIABETES MELLITUS PREDICTION

Onur KURT.....875-884

33. TRANSFORMATION OF GLUCOSE INTO HMF AND FURFURAL IN HYDROTHERMAL REACTION CONDITIONS

Koray ALPER.....885-890

34. INVESTIGATING THE IMPACT OF INSULATION THICKNESS ON CONDENSATION LEVELS: A CASE STUDY IN SİVAS, TÜRKİYE

Cenker AKTEMUR, Mutlu Tarık ÇAKIR.....891-898

Reviews

35. PATLAYICI MADDELER: SINIFLANDIRMA, GÜNÜMÜZ UYGULAMALARI VE GELECEĞE YÖNELİK YÖNELİMLER

Seyhan ATEŞECELOĞLU, Bülent İMAMOĞLU.....899-909

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1589620

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 569-571 / May 2025

CHANGE OF d_{max} VALUES OF ELEMENTS WITH Z≤54 FOR ELECTRON BEAMS

Zeynep YÜKSEL[1]*

[1]*Ondokuz Mayıs University, Vocational School of Health Services, Medical Services and Techniques Department, 55139, Samsun, Türkiye*

Abstract: In dealing with electron interactions with matter, it is important to reveal the relationship between parameters such as stopping power, range and absorbed dose. It is known that the change of mean excitation energy values, which is a quantity affecting stopping power and range calculations, according to the atomic number of the elements, confirms the shell model of the elements. In this study, it was revealed that the d_{max} value, which is closely related to dose values, is also compatible with the shell model of the elements and exhibits similar behavior with the mean excitation energy. For this purpose, EGSnrc Monte Carlo code was used to determine the d_{max} values. Calculations were carried out for three electron energies (4, 9 and 15 MeV) in medically important energy ranges. As a result, the shell structure of the elements should be taken into account in the calculation of electron interaction parameters.

Keywords: Dose, EGSnrc, Electron beams, Maximum dose depth

***Corresponding author:** Ondokuz Mayıs University, Vocational School of Health Services, Medical Services and Techniques Department, 55139, Samsun, Türkiye.
E mail: zeynep.boz@omu.edu.tr (Z. YÜKSEL)
Zeynep YÜKSEL http://orcid.org/0000-0001-7880-156X

Received: November 26, 2024
Accepted: January 08, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Yüksel Z. 2025. Change of d_{max} values of elements with Z≤54 for electron beams. BSJ Eng Sci, 8(3): 569-571.

1. Introduction

In determining the radiation effect of incoming electrons, it is important to reveal the dosimetric parameters and express the relationship between them. In clinical applications, when electron beams are handled physical aspect, dosimetric parameters such as energy and spectrum of the electron beam, beam depth dose parameters, percentage depth dose, field size, therapeutic range, flatness and symmetry are expressed. On the other hand, in theoretical approaches, parameters such as energy of electron beams, stopping power, range, mean excitation energy, absorbed dose and percentage depth dose values are introduced. The use of electron beams for therapeutic purposes requires precise measurements and calculations in which these dosimetric parameters are verified by experimental and theoretical approaches.

Although there are many studies expressing the relationship between dosimetric parameters, we have contributed to the literature studies in which the stopping power, dose and mean excitation energy for electrons are determined and their relationships with each other are revealed (Yüksel and Tufan 2018; Tufan and Yüksel, 2019; Yüksel and Tufan, 2021a). In the light of these studies, a linear relationship between stopping power and dose and the change of mean excitation energy for elements according to atomic number have been revealed separately. Based on this, the curiosity about the change of d_{max} values versus target atomic number revealed the subject of this study.

Although there has been a more detailed definition recently, in the most general approach the absorbed dose is known as the energy stored per unit mass of ionizing radiation (Protection, 2007; Grusell, 2015). Absorbed dose is often expressed using a percent depth dose curve where the dose is shown relative (Burlin et al., 1973; Andreo, 1991; Katagiri et al., 2000; Björk et al., 2002; Rogers, 2006). Distance the beam travels along its central axis from the surface to the depth where the dose is maximum is defined as the Maximum Dose Depth (d_{max}). Percentage depth dose (PDD) curve is obtained by expressing the dose at any reference depth in terms of the value at d_max distance (Khan and Gibbons, 2014). In the PDD curves for electrons, it is observed that i) a rapid rise at low energies and then a partially sharp decline, ii) a wider plateau region after the rapid rise at high energies, and iii) the d_{max} value increases with increasing energy (Strydom et al., 2005; Eldib et al., 2010; Yüksel and Tufan, 2021b). On the other hand, it is known that properties such as primary ionization energy, electron affinity, and atomic volume vary depending on the atomic number. The relationship between d_{max} value and atomic number in the interaction of electrons with target elements has not been discussed so far. In this study, dose values were obtained for elements atomic number Z≤54 using the EGSnrc code and the variation of d_{max} values with atomic number were revealed.

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

2. Materials and Methods

The absorbed dose values of the target materials for incident electron beams at therapeutic energies were obtained with the EGSnrc code. This code, which is more preferred in medical applications, examines the interaction of photons and electrons in matter in the range of 10 KeV to 50 MeV. EGSnrc is an extended and improved version of the EGS4 code system developed jointly by the NRC and the Stanford Linear Accelerator Center (Nelson et al., 1985). One of the included components, DOSXYZnrc, allows the estimation of radiation dose in certain volumetric geometries.

In this study, dose values were calculated with the DOSXYZnrc sub package using the ICRU data (Balashov et al., 1984) available in the program content with density and content information for each target material. Target materials were determined as elements with atomic number Z≤54.

The geometry of the cylinder target material with a radius of 5 cm in the direction of the central axis was simulated with a total height of 15 cm, the first 5 cm depth was simulated in 0.1 cm slices, and the next 10 cm depth was simulated in 1 cm slices. The source surface distance (SSD) was determined as 100 cm in the light of the literature (Cygler et al., 1997; Günhan et al., 2005; Kim et al., 2014). The number of particles in the simulation was planned to be 10^7, and the cut-off energy of the electrons was determined as 10KeV. Finally, using absorbed dose values, d_{max} values of elements with atomic number Z≤54 were calculated for electrons at energies of 1-20MeV.

3. Results and Discussions

As described in previous section, d_{max} values were calculated for the atoms from Z≤54 by using EGSnrc code. Figure 1 shows the change of d_{max} value according to atomic number for 3 different energies. Since the energy range of 4-15 MeV is frequently used in clinical applications, d_{max} max values with respect to atomic numbers (Z) have plotted for the energies 4, 9 and 15 MeV in Figure 1.

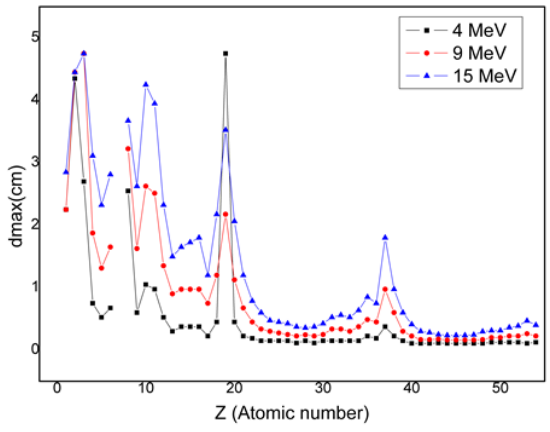


Figure 1. d_{max} values of elements with atomic number Z≤54.

It is seen that the d_{max} value gradually increases in each period, and it becomes maximum around the group 8A, then it decreases suddenly at next period. This situation shows that d_{max} values are connected with the shell structure of the atoms. When the shell structures of atoms are taken into account, the relationship between the occupancy rate and their stability is seen in d_{max} values. It is expected that d_{max} values are decreases when the atomic number increases in same energy.

d_{max} values of group 7A elements (Z= 9, 17, 35 and 53) with respect to the incident energy shows in Figure 2. As seen from the Figure 2, when atomic number increases, d_{max} values decrease. This is also expected since incident electrons interact more atomic electrons. A similar situation is seen in ionization energy. As the atomic number increases within the same group, the ionization energy decreases.

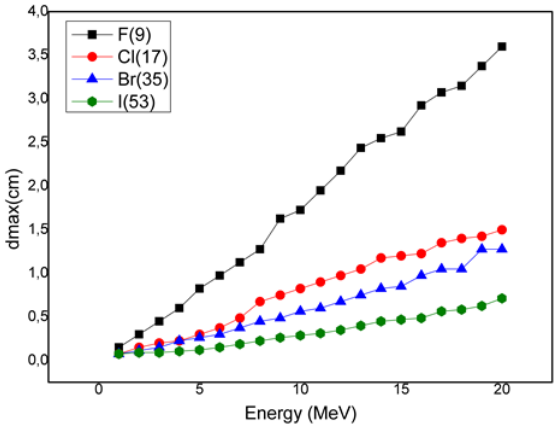


Figure 2. The change of d_{max} value with energy for elements in the 7A group.

4. Conclusions

In this study, the interaction between electron beams and elements atomic number Z≤54 is discussed in the therapeutic energy range. For this purpose dose values were obtained with the Monte Carlo approach using the EGSnrc code and d_{max} values were determined. When investigating the d_{max} values change with atomic number, shell structure in the atoms is also seen. Similar results are also observed in the mean excitation energies of the elements (Tufan and Yüksel, 2019), which is important in the calculation of stopping power and range of incident particles. Dose values and also d_{max} values are closely related with these parameters. Thus, the hypothesis question put forward in the planning of the study was confirmed and a contribution to the literature was made.

The similar behavior of d_{max} and mean excitations energy values can be lead to the new interaction models between incident particle and matter. Especially shell structure of element should be considered in the calculation of interaction parameters.

Author Contributions

The percentages of the author' contributions are presented below. The author reviewed and approved the final version of the manuscript.

	Z.Y.
C	100
D	100
S	100
DCP	100
DAI	100
L	100
W	100
CR	100
SR	100
PM	100
FA	100

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The author declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans.

References

Andreo P. 1991. Monte Carlo techniques in medical radiation Andreo P. 1991. Monte Carlo techniques in medical radiation physics. Physics Med Biol 36(7): 861.

Balashov V Springer B, Cropper W, Eisberg R, Resnick R, Evans R. 1984. International commission on radiation units and measurements (icru) stopping powers for electrons and positrons. ICRU Report 37 (ICRU Bethesda MD USA 1984), New York, USA, pp: 143.

Björk P, Knöös T, Nilsson P. 2002. Influence of initial electron beam characteristics on Monte Carlo calculated absorbed dose distributions for linear accelerator electron beams. Physics Med Biol, 47(22): 4019.

Burlin T, Sidwell J, Wheatley B. 1973. Applications of Monte Carlo methods in medical radiology. British J Radiol, 46(545): 398-399.

Cygler J, Li XA, Ding GX, Lawrence E. 1997. Practical approach to electron beam dosimetry at extended SSD. Physics Med Biol 42(8): 1505.

Eldib AA, ElGohary MI, Fan J, Jin L, Li J, Ma CMC, Elsherbini NA. 2010. Dosimetric characteristics of an electron multileaf collimator for modulated electron radiation therapy. J Applied Clin Med Physics, 11(2): 5-22.

Grusell E. 2015. On the definition of absorbed dose. Radiat Physics Chem, 107: 131-135.

Günhan B, Karaçam S, Koca A, Demir B, Emre D, Akin N. 2005. Depth dose characteristics of electron beams at extended SSD. Physica Med, 21(2): 75-80.

Katagiri M, Hikoji M, Kitaichi M, Sawamura S, Aoki Y. 2000. Effective doses and organ doses per unit fluence calculated for monoenergetic 0.1 MeV to 100 MeV electrons by the MIRD-5 phantom. Radiation Protect Dosimetry, 90(4): 393-401.

Khan FM, Gibbons JP. 2014. Khan's the physics of radiation therapy: Lippincott Williams & Wilkins, London, UK, pp: 185.

Kim MT, Lee HK, Heo YC, Cho JH. 2014. A study on effective source-Skin distance using phantom in electron beam therapy. J Magnet, 19(1): 15-19.

Nelson W, Hirayama H, Rogers D. 1985. The EGS4 code system Report SLAC-265. Standford: Stanford Linear Accelerator Center, California, USA, pp: 124.

Protection R. 2007. ICRP publication 103. Ann ICRP 37(2.4) 2.

Rogers D. 2006. Fifty years of Monte Carlo simulations for medical physics. Physics Med Biol 51(13): 287.

Strydom W, Parker W, Olivares M. 2005. Electron beams: physical and clinical aspects. Podgorsak EB (edn) Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria, pp: 273-299.

Tufan MÇ, Yüksel Z. 2019. Mean excitation energy calculations for the atoms Z≤ 54. Indian J Physics 93(3): 301-305.

Yüksel Z, Tufan MÇ. 2018. Estimating the effect of electron beam interactions with biological tissues. Canadian J Physics, 96(12): 1338-1348.

Yüksel Z, Tufan MÇ. 2021a. Relationship between dose and stopping power values for electrons in skin and muscle tissues. Radiat Environ Biophysics, 60:135-140.

Yüksel Z, Tufan MÇ. 2021b. Stopping power dependence of dmax values for biological targets. J Anatolian Physics Astron, 1(2): 35-39.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1596672

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)
Cilt 8 - Sayı 3: 572-578 / Mayıs 2025
(Volume 8 - Issue 3: 572-578 / May 2025)

MANUEL, YARI OTOMATİK VE MOBİL ROBOT TABANLI OTONOM TOPRAK BURGU MAKİNELERİNİN ALAN KAPASİTELERİNİN KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRİLMESİ

Osman ECEOĞLU[1], İlker ÜNAL[2*]

[1]*Akdeniz University, Technical Science Vocational School, Department of Control and Automation, 07070, Antalya, Türkiye*
[2]*Mehmet Akif Ersoy University, Faculty of Engineering-Architecture, Department of Mechanical Engineering, 15200, Burdur, Türkiye*

Özet: Toprak burguları, genellikle toprakta çeşitli boyut ve derinliklerde çukurlar açabilen dönen bir metal çubuk etrafına yerleştirilmiş spiral bıçaklara sahip basit makinelerdir. Meyve bahçelerinde fidan çukuru açılması başta olmak üzere, çit, elektrik, yol işaretlerinin ve işaretleme direklerinin dikilmesi gibi tarım ve endüstriyel uygulamalar için yaygın şekilde kullanılmaktadır. Piyasada, manuel, yarı otomatik, traktör üç nokta bağlantı noktasına akuple edilen tipte toprak burguları mevcuttur. Son zamanlarda teknolojik gelişmelerin de etkisiyle operatör kullanımını ortadan kaldıran mobil robot tabanlı otonom toprak burguları üzerine de çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle, büyük miktarlarda çukurların açılması gerektiğinde yoğun işçilik, işletme maliyeti ve zaman açısından hangi tip toprak burgu sisteminin kullanılması gerektiği kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, manuel, yarı otomatik ve tarafımızca geliştirilen mobil robot tabanlı otonom toprak burgusunun alan kapasitesi temelinde karşılaştırmalı performansları değerlendirilmiştir. Alan çalışması, yaklaşık 0.31 hektarlık alanda toplam 76 çukur noktası için üç farklı makinenin çalıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Çukur noktaları, yatay ve dikey yönde birbirlerinden 6 metre mesafede olacak şekilde belirlenmiştir. Alan kapasitesi belirlenirken, esas işleme, bir noktadan diğer noktaya gidiş ve ayar zamanları kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, alan kapasite değerleri manuel, yarı otomatik ve mobil robot tabanlı otonom toprak burgu makinelerine göre sırasıyla 11.62 çukur/saat, 30.04 çukur/saat, 70.38 çukur/saat olarak belirlenmiştir. Elde edilen değerler, beklenildiği gibi mobil robot tabanlı otonom toprak burgu makinesinin diğer iki makineye göre daha hızlı ve insan gücü gerektirmeden çukur açtığını göstermektedir. Yapılan çalışma, farklı tarımsal işletmecilik yöntemleri ve maliyet analizi unsurlarını da kapsayacak şekilde zenginleştirilme özelliğine sahiptir.

Anahtar kelimeler: Toprak burgusu, Mobil robot, Tarımsal işletmecilik, Alan kapasitesi

Comparative Evaluation of Field Capacities of Manual, Semi-Automatic and Mobile Robot Based Autonomous Soil Drilling Machines

Abstract: Soil augers are simple machines that usually have spiral blades placed around a rotating metal rod that can open holes in the soil in various sizes and depths. They are widely used for agricultural and industrial applications such as opening sapling holes in orchards, erecting fences, electricity, road signs and marking posts. There are manual, semi-automatic, and tractor three-point coupling type soil augers on the market. Recently, with the effect of technological developments, studies have been carried out on mobile robot-based autonomous soil augers that eliminate the use of operators. Especially when it is necessary to open large amounts of holes, it is of critical importance which type of soil auger system should be used in terms of intensive labor, operating cost and time. In this study, the comparative performances of manual, semi-automatic and mobile robot-based autonomous soil augers developed by us were evaluated based on field capacity. The field study was carried out by operating three different machines for a total of 76 hole points in an area of approximately 0.31 ha. The hole points were determined to be 6 meters apart from each other in horizontal and vertical directions. While determining the field capacity, main processing, going from one point to another and setting times were used. As a result of the calculations, field capacity values were determined as 11.62 holes/hour, 30.04 holes/hour, 70.38 holes/hour for manual, semi-automatic and mobile robot-based autonomous soil auger machines, respectively. The obtained values show that the mobile robot-based autonomous soil auger machine drills holes faster and without requiring manpower than the other two machines, as expected. The study has the feature of being enriched to include different agricultural management methods and cost analysis elements.

Keywords: Soil auger, Mobile robot, Agricultural management, Field capacity

***Sorumlu yazar (Corresponding author):** Mehmet Akif Ersoy University, Faculty of Engineering-Architecture, Department of Mechanical Engineering, 15200, Burdur, Türkiye
E mail: ilkeru@mehmetakif.edu.tr (İ. ÜNAL)
Osman ECEOĞLU https://orcid.org/0000-0001-5778-6655
İlker ÜNAL https://orcid.org/0000-0002-5188-4438

Gönderi: 05 Aralık 2024 **Received:** December 05, 2024
Kabul: 15 Ocak 2025 **Accepted:** January 15, 2025
Yayınlanma: 15 Mayıs 2025 **Published:** May 15, 2025

Cite as: Eceoğlu O, Ünal İ. 2025. Comparative evaluation of field capacities of manual, semi-automatic and mobile robot based autonomous soil drilling machines. BSJ Eng Sci, 8(3): 572-578.

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

1. Giriş

Meyve bahçelerinde giderek daha büyük alanların ağaçlandırılması gereksinimi, ağaçlandırma sektörünün bu muazzam iş hacmini yalnızca el emeğiyle tamamlamasını zorlaştırmaktadır (Pica vd., 2021). Günümüzde, meyve ağacı yetiştiriciliğinin hızla gelişmesiyle birlikte, bahçecilik uygulamaları artık büyük ölçüde çeşitli mekanik aletlerin kullanımını gerektirmektedir. Bir meyve bahçesinin mekanik operasyonu, dikim için fidan çukuru açma, fidanların çiftliğe taşınması, dikim çukuruna taşınması ve fidanları dikme aşamalarından oluşmaktadır. Ancak, fidan dikimi için çukur hazırlama süreci, mekanik fidan dikimi için gereken toplam sürenin yaklaşık %30'unu almakta ve halen insan emeği, çoğu ağaç meyvesi üretim operasyonlarının önemli bir bileşeni olmaya devam etmektedir (Lo Bianco vd., 2021). Bu çerçevede, tarımsal mekanizasyonun amacı, insan emeğine olan bağımlılığı azaltmak, çiftlik verimliliğini artırmak, tarla operasyonlarını hızlandırmak ve maliyetleri en aza indirirken yüksek gelir elde etmektir (Chi vd., 2021). Fidan çukuru açma işleminde yaygın olarak, helezon burgularla donatılmış manuel el tipi toprak burguları, benzinli veya elektrikli yarı otomatik toprak burguları ve kuvvetin mekanik veya hidrolik iletim sistemiyle iletildiği traktöre monteli toprak burguları kullanılmaktadır. Farklı uzunluk ve çaptaki helezon burgular kullanılarak, 10-20 cm çapında ve 30-100 cm derinliğinde çukurlar açılabilmektedir (Jurgensen vd., 1977). Yarı otomatik toprak burgularının motorlu kullanımındaki en önemli sorun, matkabın çukura takılıp operatöre motor tepki kuvveti uygulaması nedeniyle oluşabilecek olası tehlikelerdir ve bu da bazen can kayıplarına neden olmaktadır (Miller vd., 2006). Manuel ve yarı otomatik toprak burgularının diğer dezavantajları arasında kuru ve ağır dokulu topraklarda verimsiz çalışma, kullanıcılar için ergonomik ihtiyaçların eksikliği (zorlu çalışma koşullarında) ve birim zaman başına açtıkları fidan çukuru sayısı bulunmaktadır. Avusturalya Kırsal Güvenlik ve Sağlık Birliği'nin Mayıs 2024'te yayınladığı bir raporunda, yetiştirici çiftliklerinin %33'ündeki en riskli ekipmanın toprak burguları olduğu ifade edilmektedir (RSHA04, 2024). Manuel toprak burguları tamamen insan gücüyle çalışmakta ve bir çukur açmak için gereken ortalama süre toprak yapısına göre çukur başına 3-5 dakika arasında değişebilmektedir. Bu durum, bir operatör tarafından yönlendirilen yarı otomatik makinelerde ise çukur başına yaklaşık 1-2 dakika sürmektedir. Traktör üç nokta bağlantı noktasına takılan PTO (Power Take Off) tahrikli toprak burguları ise çok fazla fidan çukurunu hızlı şekilde açma işleminde manuel ve yarı otomatik toprak burgularına göre açık ara en çok kullanılan makinedir. Yapılan bir araştırmada, traktöre monte edilen toprak burgusunun kumlu (%93) toprakta 30 cm çapında 60 cm derinliğindeki bir fidan çukurunu 60-100 s arasında açtığı ifade edilmektedir (El-Gendy vd., 2009). Ancak buradaki temel problem, traktör kullanımından kaynaklanan yakıt sarfiyatı ve toprakta oluşan sıkışma olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, 21 Şubat 2008 yılında Amerika'nın Washington eyaletinde, traktöre monte edilmiş toprak burgusu ile elma bahçesinde çukur açarken bir işçinin kolunu burguya kaptırdığı ve orada hayatını kaybettiği rapor edilmiştir (FACE/WA, 2010). Teknolojideki gelişmeler ve otonom sistemlerin tüm sektörleri etkisi altına aldığı günümüzde, meyve bahçelerinde fidan çukuru açma işleminin hem çalışan sağlığı hem de zamandan tasarruf açısından otonom şekilde yapılması zorunlu hale gelmiştir. Tarımsal üretim alanları, ister bitkisel üretim ister meyve bahçeleri olsun, karmaşık ve heterojen bir yapıya sahiptir. Son birkaç yılda, çok sayıda araştırma enstitüsü tarafından farklı tarımsal amaçlar için robot traktörler ve mobil robotlar üretilmiştir. Meyve bahçesi platformlarının verimliliği artırdığı gösterilmiş olsa da, sundukları avantajlara kıyasla sınırlı uygulanabilirlikleri ve yüksek maliyetleri, bunların yaygın olarak benimsenmesini engellemiştir. Tamamen manuel, kısmen manuel veya tamamen otonom modlarda kullanılabilen paylaşımlı bir mobil platform, meyve bahçesi ortamı için çok önemlidir. Meyve bahçeleri, organize ortamları nedeniyle tarımda robotları ve otomatik sistemleri uygulamak için en iyi yer gibi görünmektedir (Bochtis vd., 2015). Ayrıca, meyve bahçesi endüstrileri için ciddi bir tehlike de, mevsimlik meyve bahçesi görevleri için kalifiye iş gücünün azalmasıdır. Bu nedenle, robotik meyve bahçesi çözümleri geliştirmek kritik bir öneme sahiptir (Verbiest vd., 2021). Son elli yılda ilaçlama ve hasat gibi çeşitli meyve bahçesi görevlerinin otomasyonu üzerine çok sayıda çalışma yürütülmüştür. Bu araştırma çalışmalarının çoğu tek bir göreve odaklanmıştır (Silwal vd., 2017). Meyve bahçeleri için çok sayıda otomatik hasat robotu prototipi bulunmaktadır (Bac vd., 2014; Onishi vd., 2019; Zhang vd., 2021; Xiong vd., 2022; Chen vd., 2022). Ek olarak, literatürde meyve bahçesi ortamlarında seyreltme (Gonzalez vd., 2023), ilaçlama (Liu vd., 2022), budama (Botterill vd., 2017) ve mobil navigasyon (Jia vd., 2023) gibi robotik görevler üzerine de çalışmalar bulunmaktadır. Yukarıda listelenen her meyve bahçesi yönetim operasyonu, aktüatörleri meyve bahçesinde hareket ettirmek için mobil bir platforma ihtiyaç duymaktadır. Bununla birlikte, meyve bahçesi kurulumu bağlamında fidan dikimi için çukur açan otonom bir robot üzerinde hiçbir araştırma çalışması yapılmamıştır. 2011 yılında, Amerikan Tarım ve Biyolojik Mühendisler Birliği (ASABE), tarım makineleri operasyonlarının verimliliğini ölçmek için etkili tarla kapasitesi (EFC) ve tarla verimliliği (FE) olarak adlandırılan iki önemli standardı ortaya koymuştur (Adamchuk vd., 2011). Teorik tarla kapasitesi (TFC), yalnızca makinenin tam çalışma genişliğine ve tarladaki ortalama seyahat hızına bağlıdır. Makinenin tam çalışma genişliği kullanıldığında verilen tarla hızında elde edilebilecek maksimum olası tarla kapasitesini temsil etmektedir. EFC, dönüşler ve diğer gecikmeler nedeniyle TFC'den daha azdır. EFC'nin TFC'ye oranına ise makinenin alan verimliliği (FE) denmektedir. Bir tarım

makinesinin tarla kapasitesi, birincil işlevini yerine getirme hızıdır, yani herhangi bir makinenin çalışma saati başına işleyebildiği alan büyüklüğü veya bir toprak burgusunun saatte açtığı çukur sayısıdır. Makine kapasitelerinin ölçümleri veya tahminleri, tarla operasyonlarını, güç ünitelerini, iş gücünü planlamak ve makine işletme maliyetlerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmanın genel amacı, meyve bahçeleri kurulumunda fidan çukuru açmak için kullanılan manuel, yarı otomatik ve mobil robot tabanlı toprak burgularının teorik alan kapasitesi bağlamında karşılaştırmalı değerlendirilmesini yapmaktır.

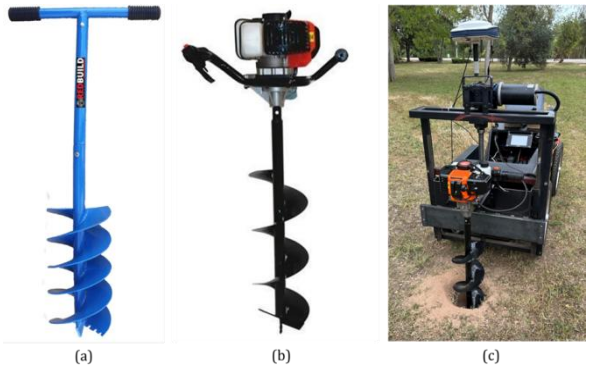
2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı

Manuel, yarı otomatik ve mobil robot tabanlı toprak burgusu ile yapılan tüm deneysel değerlendirmeler Akdeniz Üniversitesi içerisinde bulunan deneme arazisinde (36° 53′ 54″ K ve 30° 38′ 27″ D) gerçekleştirilmiştir. Deney alanı deniz seviyesinden 32 m yükseklikte olup 0.31 ha alana sahiptir. Çalışma alanının toprak türü killi-tınlı olup, %42 kum, %25 silt, %33 kilden oluşmaktadır. Her üç makina, 76 ayrı nokta için çalıştırılmıştır. Toprak burguları, her noktada 20 cm çapta ve 30 cm derinliğinde dikim çukuru kazmak için kullanılmıştır. Meyve bahçelerinde en basit ve en yaygın kullanılan dikim yöntemi kare sistemi olması nedeniyle çukur noktaları 6 x 6 m olacak şekilde seçilmiştir.

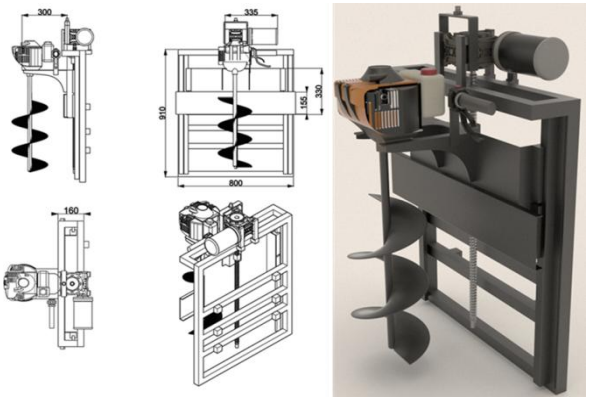
2.2. Çalışmada Kullanılan Toprak Burguları

Çalışmada üç farklı toprak burgusu kullanılarak teorik alan kapasiteleri hesaplanmış ve karşılaştırmaları yapılmıştır. Bunlar T-saplı manuel toprak burgusu, motorlu toprak burgusu ve tarafımızca geliştirilen mobil robot tabanlı otonom toprak burgusudur (Şekil 1).



Şekil 1. (a) T-saplı manuel toprak burgusu (b) motorlu toprak burgusu (c) mobil robot tabanlı otonom toprak burgusu.

Manuel toprak burgusu zahmetsiz fidan çukuru açmak için tasarlanmış güçlü bir araçtır. Gövde bölümü A3 tip paslanmaz çelik malzemeden, 20 cm çapa sahip matkap ucu ise spiral şeklinde tek bıçak paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir. Net ağırlığı 3.9 kg olan toprak burgusu 40x90x20 cm boyutlara sahiptir. Motorlu burgu makinesi, hava soğutmalı iki zamanlı 2.1 hp motor, 51.7 cm^3 silindir hacmi ve 34:1 redüksiyon oranına sahip olup çalışırken 1.6 kW güç tüketmektedir. Ağırlığı 14.8 kg olan burgu makinesinin yakıt deposu 0.80 lt dir. Çalışmada tarafımızca geliştirilen mobil robotun arkası için tasarlanan düşey hareket mekanizmasına motorlu toprak burgu makinesi akuple edilmiştir (Eceoğlu ve Ünal, 2024). Motorlu toprak burgusunun düşey hareketini sağlayan mekanizmasının yapımında paslanmaz çelik kullanılmıştır. Mekanizmanın bazı parçaları 30x30x3 mm ölçülerinde kare çelik borudan yapılmıştır. H şeklindeki taşıyıcı ızgara ve toprak burgu makinesi, sistemin mekanik yapısını oluşturan iki bileşendir. Sistemin düşey hareketi için iki adet 30 × 30 910 mm ve üç adet 30 × 30 800 mm kare çelik boru kullanılarak H şeklinde bir taşıyıcı ızgara oluşturulmuştur. Daha sonra bu H şeklindeki taşıyıcı ızgara otonom mobil robotun arkasına monte edilmiştir. Toprak burgusu ise H şeklinde bir ızgara üzerine akuple edilmiştir (Şekil 2). H şeklindeki ızgara üzerindeki iki çelik doğrusal kılavuz, yastık blokları ve 30 mm doğrusal ray şaft kılavuz destekleri ile ayarlanmaktadır. Doğrusal kılavuzların uzunluğu 910 mm'dir. Düşey hareket için 1:40 redüksiyonlu bir dişli kutusu, 30 × 850 mm bilyalı vidayı çeviren 24 V, 500 W, 1440 rpm DC motora bağlanarak doğrusal bir aktüatör oluşturulmuştur.



Şekil 2. Toprak burgu makinesinin ve H biçimli ızgaranın tam ölçekli teknik çizimi.

2.3. Makine Kapasitesi Metodolojisi

Makine kapasitesi terimi, makinenin gerçekleştirdiği işe bağlı olarak birim zamanda yapılabilen iş miktarını ifade etmektedir. Tarım makineleri için kapasite ölçüleri teorik tarla kapasitesi, efektif tarla kapasitesi ve malzeme kapasitesidir. Makinenin kapasitesi, uygun çalışma hızı ve iş genişliğiyle ilgili olduğu kadar yapılan işin özelliğine göre çalışılabilecek süreyle de ilişkilidir. Makine kapasitesi, birim zamanda (saat) yapılan iş miktarı olarak tanımlanabilir ve birimi; ha/h, ton/h, Mg/h veya işlenen materyal miktarı (kg veya ton)/h vb. cinsinden olabilir (ASAE, 1999). Teorik tarla kapasitesi, makinenin nominal ileri hızda zamanın %100'ünde işlevini yerine getirmesi ve her zaman nominal genişliğinin %100'ünü kaplaması durumunda elde edilecek tarla kapsama oranıdır. Teorik tarla kapasitesinin hesaplamada kullanılan formül eşitlik 1'de verilmiştir.

$$TFC = \frac{Makine\ Genişliği\ (cm) * İlerleme\ Hızı\ \left(\frac{m}{s}\right) * 36}{10000}\ ha/h \qquad (1)$$

Gerçek çalışma koşullarında efektif tarla kapasitesi, dönüşler ve diğer gecikmeler nedeniyle teorik tarla kapasitesinden daha azdır. Tarım makinelerinin tarla verimliliği, gerçek teorik tarla süresinin tarlada geçirilen toplam süreye oranıdır. Bu oran, çalışma düzeni ve tarlanın fiziksel koşullarına bağlı olarak sistemin ne kadar verimli olduğunu göstermektedir. İdeal çalışmada, makine tüm zamanını (teorik tarla süresi) optimum çalışma hızında ve iş genişliğinde ana görevini tamamlamak için kullanmaktadır. Ancak gerçekte, makine tarla verimliliğini düşüren dönme, durma, tamir, bakım, yakıt veya materyal doldurma gibi diğer verimsiz zaman unsurlarında da zaman harcamaktadır.

2.4. Fidan Çukuru Noktalarının Koordinat Haritasının Oluşturulması

Meyve bahçesinde açılacak olan fidan çukurlarının coğrafi koordinatlarının (enlem, boylam) oluşturulması için ArcGIS 10.5 (Esri, CA, ABD) coğrafi bilgi platformu içerisinde bulunan ArcMap uygulaması kullanılmıştır. Meyve bahçesi kurulumunda en basit ve en yaygın kullanılan kare dikim yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle, çalışma yapılacak olan alana ait uydu görüntüsü https://earthexplorer.usgs.gov aracılığı ile Landsat-9'dan elde edilmiştir. ArcMap uygulamasına yüklenen uydu görüntüsünün sayısallaştırılması için çalışma alanının dört köşesinden Promark 500 RTK-GPS alıcısı (Magellan Co., Santa Clara, CA, ABD) kullanılarak gerçek koordinat verisi toplanmıştır. Sayısallaştırılan uydu görüntüsü üzerinde açılacak fidan çukurlarının konumları hem yatay hem de dikey eksende aralarında 6 m olacak şekilde toplamda 76 koordinat noktası işaretlenerek konum haritası oluşturulmuştur (Şekil 3). Oluşturulan konum haritası hem Microsoft Excel dosyası hem de Microsoft SQL Server üzerindeki veri tabanına aktarılabilir özelliktedir.



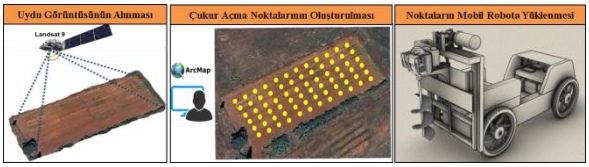
Şekil 3. ArcMap uygulaması üzerinde oluşturulan fidan çukuru açma noktalarına ait konum haritası.

Oluşturulan konum haritası üzerindeki noktalar mobil robot tabanlı otonom burgu makinasının gideceği noktaların enlem ve boylam verilerini içermektedir. Noktaların kuzey yönüne doğru 20 cm aralıklarla manuel ve yarı otomatik toprak burgularının delme noktaları aynı düzlemde olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 4. Manuel, yarı otomatik ve otonom toprak burgularına ait konum noktalarının gösterimi.

Şekil 5'te fidan çukuru açmak için gerekli olan ofis çalışması ve mobil robot tabanlı otonom toprak burgu makinasına verilerin yüklenmesine ait blok şema gösterilmiştir.



Şekil 5. Yapılan çalışmanın bütününü temsil eden blok şema.

3. Bulgular

Manuel toprak burgu makineleri ile insan gücüne bağlı olarak bir fidan çukuru açmak için gereken ortalama süre, çukur başına 3-5 dakika arasında sürmektedir. Yarı otomatik toprak burgu makinasında ise fidan çukuru açma işlemi çukur başına yaklaşık 1-2 dakika arasında sürmektedir. Belirtilen bu süreler çukur açma işlemine başlama ve bitirme arasındaki süreleri ifade etmektedir. Noktadan noktaya makinanın taşınması, çalıştırılması veya diğer kayıp zamanlar bu sürenin içerisine dâhil değildir. Yapılan çalışmada yürüme, ayar ve çukur açma işlemi dâhil olmak üzere 76 fidan çukuru için hesaplanan toplam süreler Tablo 1'de verilmiştir. Manuel ve mobil robot tabanlı toprak burgu makineleri için herhangi bir ayar işlemi yapılmamıştır. Yarı otomatik toprak burgusunda ise her çukur açma işleminde motor çalıştırılıp işlem bitince kapatılmıştır. Çalışmanın makine ve alan kapasitesi bağlamında hesaplanan değerler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. 76 çukur noktası için hesaplanan toplam süreler

	Yürüme (s)	Ayar (s)	Çukur Açma (s)	Toplam (s)
Manuel	738	0	22800	23538
Yarı Otomatik	738	1520	6840	9098
Robot	304	0	3572	3876

Tablo 2. Makine ve alan kapasiteleri

	TOPLAM (h)	TCF (çukur/h)	TCF (ha/h)
Manuel	6.54	11.62	0.047
Yarı Otomatik	2.53	30.04	0.12
Robot	1.08	70.38	0.29

Toplam 76 fidan çukuru için yapılan değerlendirmeye göre, manuel toprak burgusu için noktadan noktaya yürüme, makine ayarı ve çukur açma işlemleri her bir çukur için yaklaşık 5.16 dakika sürmektedir. Yarı otomatik toprak burgusu için bu süre yaklaşık 2.00 dakika ve mobil robot için 0.85 dakika olarak hesaplanmıştır. Birim saat başına çukur açma sayısını temsil eden makine kapasitesi, mobil robot için yarı otomatik toprak burgusuna göre yaklaşık 2.5 kat, manuel toprak burgusuna göre 6 kat hızlı çalıştığını göstermektedir. Benzer şekilde birim saat başına işlenen hektar miktarını temsil eden alan kapasitesinde de benzer oranlar gözlemlenmektedir. Ayrıntılı hesaplamalar, Mobil robot tabanlı otonom toprak burgu makinesinin saatte ortalama 70 çukur ve 8 saatlik bir iş gününde 560'a kadar çukur açabildiğini göstermektedir. Mobil robot tabanlı otonom toprak burgu makinesi, çukur başına ortalama 47 saniyelik çukur açma süresine sahiptir. Elde edilen değerler, beklenildiği gibi mobil robot tabanlı otonom toprak burgu makinesinin diğer iki makineye göre daha hızlı ve insan gücü gerektirmeden fidan çukuru açtığını göstermektedir.

4. Tartışma

Teknoloji alanında yaşanan gelişmeler, meyve bahçesi mekanizasyon teknolojilerinin de değiştirilmesi ihtiyacını, yeni ve verimli makinelerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Yoğun meyve bahçeleri, büyük miktarlarda meyve üretimi ve otonom mekanize işlemler için uygun koşullar sağlamaktadır. Bir meyve bahçesi kurmak için dikim materyalinin seçilmesi, fidanlar arasında yatay ve dikey düzlemde mesafelerin belirlenmesi, arazi işaretlemesi, fidan çukuru açma ve fidan dikme aşamalarının tamamlanması gerekmektedir. Bu süreçte mekanizasyona iki aşamada ihtiyaç duyulmaktadır: fidan çukuru açmak ve fidan dikmek. Ağaç meyveleri üretmek için otomatik yöntemlerle ilgili araştırmaların çoğu, budama ve hasatla ilgili işlemlere odaklanmıştır. Literatürde, bir meyve bahçesi kurulumunda fidan çukuru açmak için GIS tabanlı otonom bir robot kullanımı ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yeni bir meyve bahçesi inşa ederken mekanize işlemler konusu dikkatlice ele alınmalı ve otonom sistemler ve ilgili destekleyici altyapı ile donatılmalıdır (Lei vd., 2023). Bu nedenle, yapılan çalışma yeni bir meyve bahçesi kurarken fidanların nereye dikilmesi gerektiğini bulmak için çok önemlidir. Fidanların gerçek konumu bu teknoloji tarafından önceden belirlendiğinden, otonom makinelerin birçok dikim ve bakım işlemlerini önceden planlanan rotalar üzerinden gerçekleştirebileceğini düşünebiliriz. Mekanizasyon, görevlerin zamanında tamamlanmasını ve birim alan başına daha düşük maliyetleri garantilediği için tarım için hayati bir önem taşımaktadır. Günümüzde, meyve ağacı yetiştiriciliğinin hızla gelişmesi nedeniyle, bahçecilik uygulamaları artık büyük ölçüde çeşitli mekanik aletlerin kullanımını gerektirmektedir. Bahçecilik için en önemli aletlerden biri de toprak burgu makinesidir. Dikim çukurunu hazırlama süreci, bahçecilikte mekanik fidan dikimi için gereken toplam sürenin yaklaşık %30'unu almaktadır (El-Gendy vd., 2009). Bu oran, toplam süreçte çok büyük bir zaman miktarını kapsamaktadır. Geleneksel fidan çukuru açma yöntemi, zaman alıcı ve fiziksel olarak zorlayıcı olmasının yanı sıra, operatör yorgunluğuna da hızla neden olabilmektedir. Fidan çukuru açma makinelerinin iki ana kategorisi: manuel ve benzinli veya elektrikli toprak burgulardır. Elektrikli veya benzinli burgular bir motor veya matkapla çalışırken, manuel burgular insan emeğine ihtiyaç duyar ve daha küçük projeler için en kullanışlı olanıdır. Büyük çapta meyve bahçesi kurulumunda ise traktör üç nokta bağlantı düzeneğine bağlanan ve traktör PTO'sundan hareket alan toprak burguları tercih edilmektedir. Bahçecilikte kullanılan tüm bu fidan çukuru açma makinelerinin temel amacı, insan gücünü azaltmak ve bahçecilik üretkenliğini artırmaktır (Kaur vd., 2023). Ancak, manuel toprak burgularının birim alan başına çukur açma sayısı ve tamamen insan gücüne bağımlı çalıştırılması nedeniyle büyük bahçelerde kullanılmamaktadır. Aynı şekilde, yönlendirilmesi insan gücüyle yapılan elektrikli veya benzinli toprak burgularının ağırlıkları nedeniyle taşınması ve çalışma esnasında çok fazla toz çıkararak işçilerin sağlığına ciddi zararlar verme durumları da kullanımlarını kısıtlamaktadır. Traktöre bağlı çalışan toprak burgularında ise yakıt tüketimi, toprak sıkışıklığı oluşturma ve toprak burgusunun traktör arkasında yönlendirilmesini sağlayan çalışanın, fiziksel yaralanmasına sebebiyet verme gibi olumsuzluklar bulunmaktadır. Tüm bu olumsuzluklar değerlendirildiğinde, mobil robot tabanlı otonom bir toprak burgusunun geliştirilmesinin, daha düşük işçilik maliyetleri ve birim zaman başına daha yüksek üretkenlik dâhil olmak üzere önemli faydalar sağlayacağı açıktır. Ancak, bahsedilen faydanın sayısal olarak tanımlanması ihtiyacı bu çalışmanın gerekliliğini ortaya koymaktadır. Literatürde bu zamana kadar manuel, yarı otomatik ve traktöre monteli toprak burgularının makine veya alan kapasitelerine göre karşılaştırıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca, mobil robot tabanlı otonom toprak burgusu geliştirme ile ilgili tek bir çalışma bulunmaktadır (Eceoğlu ve Ünal, 2024). Yapılan çalışmada, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) kullanarak meyve bahçelerinde ağaç dikilecek yerleri belirlemeyi, otonom bir fidan çukuru açma makinesini geliştirmeyi ve geliştirilen mobil robot ile fidan çukurları açmak için kullanmayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda, mobil robot tabanlı otonom toprak burgu makinesinin diğer

kullanılan toprak burgularıyla olan sayısal karşılaştırmalarına da literatürde rastlanmamıştır. Mobil robot tabanlı otonom toprak burgusu için gereken yatırım maliyeti yaklaşık 5.000 dolardır. Bu maliyet yüksek gibi görünse de, makine yatırım maliyetini büyük ölçüde aşabilecek çok sayıda uzun vadeli fayda sunmaktadır. Operasyonel verimliliği önemli ölçüde artırması, manuel işgücüne olan ihtiyacı azaltması ve işçilik maliyetlerini düşürmesi yanı sıra meyve bahçesi kurulumlarının hassasiyetini de artırmaktadır. Bu hassasiyet, optimum fidan büyümesini ve sağlığını sağlamak ve daha yüksek ürün verimini sağlaması açısından önemlidir. Sonuç olarak, bu birleşik avantajlar ilk yatırımı geri kazanmaya ve kullanıcılara devam eden ekonomik faydalar sağlamaya yardımcı olabilir ve bu yenilikçi teknolojinin benimsenmesini uzun vadede finansal olarak doğru bir karar haline getirebilir.

5. Sonuç

Meyve bahçeleri için fidan çukuru açmak zaman alıcı ve zahmetli bir işlemdir. Çok sayıda çiftçi küçük alanlar için manuel veya yarı otomatik toprak burgusu ve geleneksel çukur açma yöntemlerini kullanmaktadır. Ancak bu makinelerin kullanımında operatör gücü yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Büyük alanlar için ise operatör gücünü minimize etmek amacıyla traktöre monteli çukur açıcılar kullanılmaktadır. Ancak, traktöre monteli çukur açıcıları, engebeli ve küçük alanlardaki manevra kabiliyetlerindeki yetersizlik, yakıt sarfiyatı ve edinim maliyetinin fazlalığı gibi nedenlerle fayda maliyet açısından dezavantajlara sahiptir. Bu bağlamda, manuel, yarı otomatik ve mobil robot tabanlı toprak burgularının makine veya alan kapasitelerinin karşılaştırılması tarımsal mekanizasyon açısından önemlidir. Yapılan çalışmanın sonucunda, mobil robot tabanlı toprak burgusu hem birim alan başına çalışma süresi hem de birim zaman başına çukur açma sayısı açısından yarı otomatik toprak burgusuna göre yaklaşık 2.5 kat, manuel toprak burgusuna göre ise 6 kat hızlı çalıştığı belirlenmiştir. Ayrıca mobil robot tabanlı toprak burgusunun, operatör işgücünü neredeyse ortadan kaldırması nedeniyle hem maliyet hem de operatör sağlığını koruyucu bir çözüm olması açısından önemli olduğu değerlendirilmektedir. Yapılan çalışma, farklı tarımsal işletmecilik yöntemleri ve maliyet analizi unsurlarını da kapsayacak şekilde zenginleştirilme özelliğine de sahiptir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	O.E.	İ.Ü.
K	50	50
T	50	50
Y	50	50
VTI	50	50
VAY	50	50
KT	50	50
YZ	50	50
KI	50	50
GR	50	50
PY	50	50
FA	50	50

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

Adamchuk VI, Grisso R, Kocher MF. 2011. Spatial variability of field machinery use and efficiency. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, pp: 135–146.

ASAE. 1999. EP496.2 Agricultural machinery management. URL: https://www.academia.edu/41779575/S_T_A_N_D_A_R_D_ASAE_EP496_2_DEC99_Agricultural_Machinery_Management (accessed date: December 04, 2024).

Bac WC, van Henten EJ, Hemming J, Edan Y. 2014. Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead. J Field Rob, 31(6): 888–911.

Bochtis D, Griepentrog HW, Vougioukas S, Busato P, Berruto R, Zhou K. 2015. Route planning for orchard operations. Comput Electron Agric, 113: 51–60.

Botterill T, Paulin S, Green R, Williams S, Lin J. 2017. A robot system for pruning grape vines. J Field Rob, 34(6): 1100–1122.

Chen K, Li T, Yan T, Xie F, Feng Q, Zhu Q, Zhao C. 2022. A soft gripper design for apple harvesting with force feedback and fruit slip detection. Agri, 12(11): 1802.

Chi Y, Zhou W, Wang Z, Hu Y, Han X. 2021. The ınfluence paths of agricultural mechanization on green agricultural development. Sustainabil, 13(23): 12984.

Eceoğlu O, Ünal İ. 2024. Optimizing orchard planting efficiency with a gıs-ıntegrated autonomous soil-drilling robot. Agri Engin, 6(3): 2870-2890.

El-Gendy H, Abd El-Halim S, Morghany H, Aboukarima A. 2009. Evaluating performance of a post hole digger. J Soil Sci Agric Eng, 34(5): 5783–5793.

FACE/WA. 2010. Orchard laborer caught in tractor-mounted post hole digger. URL: https://nasdonline.org/7285/d002499/washington-face-orchard-laborer-caught-in-tractor-mounted.html (accessed

date: December 04, 2024).

Gonzalez Nieto L, Wallis A, Clements J, Miranda Sazo M, Kahlke C, Kon TM, Robinson TL. 2023. Evaluation of computer vision systems and applications to estimate trunk cross-sectional area, flower cluster number, thinning efficacy and yield of apple. Horticulturae, 9(8): 880.

Jia L, Wang Y, Ma L, He Z, Li Z, Cui Y. 2023. İntegrated positioning system of kiwifruit orchard mobile robot based on UWB/LiDAR/ODOM. Sensors, 23(17): 7570.

Jurgensen MF, Larsen MJ, Harvey AE. 1977. A soil sampler for steep, rocky sites. Research note INT-217. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Inter-mountain Forest and Range Experiment Station. URL: https://archive.org/details/soilsamplerforst217jurg/page/n7/mode/2up (accessed date: December 04, 2024).

Kaur B, Mansi; Dimri S, Singh J, Mishra S, Chauhan N, Kukreti T, Sharma B, Singh SP, Arora S, et al. 2023. Insights into the harvesting tools and equipment's for horticultural crops: From then to now. J Agric Food Res, 14: 100814.

Lei X, Yuan Q, Xyu T, Qi Y, Zeng J, Huang K, Sun Y, Herbst A, Lyu X. 2023. Technologies and equipment of mechanized blossom thinning in orchards: a review. agronomy, 13(11): 2753.

Liu L, Liu Y, He X, Liu W. 2022. precision variable-rate spraying robot by using single 3D LIDAR in orchards. Agronomy, 12(10): 2509.

Lo Bianco R, Proietti P, Regni L, Caruso T. 2021. Planting systems for modern olive growing: Strengths and weaknesses. Agri, 11(6): 494.

Miller J, Fragar L, Franklin R. 2006. Farm machinery safety. Injuries associated with posthole diggers. Australian Centre for Agricultural Health and Safety and Rural Industries Research and Development Corporation. URL: https://agrifutures.com.au/product/farm-machinery-safety-injuries-associated-with-posthole-diggers/ (accessed date: December 04, 2024).

Onishi Y, Yoshida T, Kurita H, Fukao T, Arihara H, Iwai A. 2019. An automated fruit harvesting robot by using deep learning. Robomech J, 6: 13.

Pica AD, Boja F, Teuşdea A, Fora C, Moatar M, Boja N. 2021. The usage motor drill in forestry planting. Actual Tasks on Agricultural Engineering. In Proceedings of the 48th International Symposium, March 2–4, Zagreb, Croatia, pp: 237–248.

RSHA04. 2024. Mobile plant safety on farm: practices and perceptions. Snapshot report. URL: https://rsha.com.au/wp-content/uploads/2024/06/RSHA04-practices-May-2025.pdf (accessed date: December 04, 2024).

Silwal A, Davidson JR, Karkee M, Mo C, Zhang Q, Lewis K. 2017. Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester. J Field Rob, 34(6): 1140–1159.

Verbiest R, Ruysen K, Vanwalleghem T, Demeester E, Kellens K. 2021. Automation and robotics in the cultivation of pome fruit: Where do we stand today? J Field Rob, 38(4): 513–531.

Xiong Z, Feng Q, Li T, Xie F, Liu C, Liu L, Guo X, Zhao C. 2022. Dual-Manipulator Optimal Design for Apple Robotic Harvesting. Agron, 12(12): 3128.

Zhang K, Lammers K, Chu P, Li Z, Lu R. 2021. System design and control of an apple harvesting robot. Mechatron, 79: 102644.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1553227

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 579-590 / May 2025

THE EFFECT OF CURD COOKING TEMPERATURE AND TIME ON CHEMICAL AND MELTING PROPERTIES IN CHEESE PRODUCED WITH THE TRADITIONAL METHOD

Esen Bilge BİÇER[1*], Nursel DEVELİ IŞIKLI[2]

[1]*Sivas Cumhuriyet University, Zara Vocational College, Food Processing Department, 58500 Sivas, Türkiye*
[2]*Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Engineering, Food Engineering Department, 58500 Sivas, Türkiye*

Abstract: In this study, the yield and melting behavior of traditionally produced cheeses were analyzed by applying different curd cooking temperatures and times. The cheeses produced by using three different curd cooking times (1 minute, 6 minutes and 11 minutes) and two different curd cooking temperatures (55°C and 65°C) were brined for 90 days and were brined on the 1st, 30th, 60th and 90th days. The process, chemical properties and melting behavior of the cheeses were determined. In the study, the chemical and physical properties of the cheeses produced vary depending on the cooking temperature, cooking time and ripening time. The melting behavior of cheeses was determined according to the initial melting point, degree of fluidity and average flow rate obtained from melting profiles. The initial melting point increased with increasing temperature but decreased with decreasing cooking time. The degree of fluidity and average flow rate of cheeses cooked at 55°C were calculated to be higher than those of cheeses cooked at 65°C. Increasing the curd cooking temperature decreased the fluidity of the cheeses and increased the average flow rate. With increasing cooking time, the flowability of the cheeses decreased while the average flow rate increased.

Key Words: Curd cooking time, Curd cooking temperature, Cheese ripening, Melting behavior

***Corresponding author:** Sivas Cumhuriyet University, Zara Vocational College, Food Processing Department, 58500 Sivas, Türkiye
E mail: bbicer@cumhuriyet.edu.tr (E.B. BİÇER)
Esen Bilge BİÇER https://orcid.org/0000-0003-0500-8303
Nursel DEVELİ IŞIKLI https://orcid.org/0000-0002-5160-2322

Received: September 24, 2024
Accepted: January 20, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Biçer EB, Develi Işıklı N. 2025. The effect of curd cooking temperature and time on chemical and melting properties in cheese produced with the traditional method. BSJ Eng Sci, 8(3): 579-590.

1. Introduction

Cheese has a special importance in human nutrition due to its long shelf life and the fact that it contains a significant part of the nutrients in milk (protein, milk fat, calcium, phosphorus and some vitamins). It is the dairy product with the most variety in the world because it is produced with different techniques almost all over the world (Kwak et al., 2011).

Due to the differences in the type of milk used today and the production methods, there are hundreds of different types of cheese in the world. In Türkiye various local cheeses are produced according to the regional conditions, cultural habits, animal breeds and species, and production differences of each region, mainly in the Aegean, Eastern Anatolia, Black Sea, and Central Anatolia. For example, white cheese produced in and around Sivas province by mixing sheep's milk and cow's milk is one of the local cheeses that is structurally a hard cheese and has similar behavior to Kashar cheese due to its meltability and is preferred by consumers due to its meltability.

There has been a significant increase in cheese production and consumption in Türkiye in recent years. One of the most important factors in this increase is that traditional cheeses have become sought after, especially in big cities, as a result of the production of traditional cheeses by medium or large-scale enterprises outside the region where they are produced. Therefore, the popularity of local cheeses such as Cecil, Dil, Örgü, Otlu and Mihaliç has increased, as well as Beyaz, Kashar and Tulum cheeses (Hayaloglu et al., 2008).

Pizza, various sauces, etc. are prepared with temperature applications that will ensure the melting and flow of the cheese contained in it. The preference or acceptance of these foods by the consumer depends on the quality of the melted cheese. For this reason, the melting and flow properties of cheese are critical in foods containing cheese.

The melting quality of the cheese is often defined in the industry as "meltability". Meltability is one of the most important functional properties of cheese, and it is defined as how easily the cheese melts and spreads when heated. Cheese meltability includes two aspects: ease of melting and flow size. While the ease of melting is directly related to heat transfer and heat process change of cheese; the flow size is related both to the force to cause the flow and to the high-temperature rheological properties of the cheese. For this reason, heat phase change and rheological properties of cheese should be taken into consideration while determining the melting properties of cheese (Gunasekaran and Ak, 2003).

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

Changes in the protein network structure explain the mechanism of cheese melting. The integrity of the network structure of cheese, which consists of three-dimensional para-caseinate, is provided by cross-links between proteins. The network structure, in which moisture and oil are trapped separately or in combined masses, resembles a sponge (Fox et al., 2000). Fat is the only component that truly melts in cheese, but increasing the temperature loosens the protein-protein bonds, causing the structure to soften and flow. In the cheese gel, which shrinks with energy, fat and water are separated at the macroscopic level, and protein-protein interactions are changed at the molecular level. At temperatures above 40°C, the number and strength of the bonds in the protein network structure decrease, the casein micelles change from an elastic state to a viscous fluid state, and the contact area between the casein particles also decreases. The decrease in the contact areas of the proteins and the decrease in the hydrogen bonds weaken the protein network structure (Udayarajan, and Lucey, 2005)

The melting property of cheese is made by observation-based tests such as Schrebier and Arnott (Arnott et al., 1957). However, in practice, a new objective evaluation was needed because it takes a long time to examine the melting properties of these tests under different temperatures, different sample shapes and sizes, and the objective evaluation is difficult. In line with this need, Gunasekaran and his research team at the University of Wisconsin designed and developed an instrument to objectively measure the melting/flow behavior of cheeses at different temperatures, and they named this device the "Uw Melting Meter".

The melting property of cheese changes according to the processes applied and the ratio of the molecules in its composition. Since the chemical events occurring during cheese ripening affect the composition, cheese ripening has a direct effect on the melting property. As casein-casein and casein-water interactions increase as a result of increased hydrolysis with proteolysis occurring during ripening, the flow of casein aggregates becomes easier and cheese solubility increases. In addition, the increase in cheese fat content increases its meltability. This effect is due to the increased fat content weakening the protein matrix (Everett and Auty, 2008).

In this study, the effects of different curd cooking temperatures (55°C and 65°C) and cooking times (1 min., 6 mins. and 11 mins.) on the melting behavior of the cheeses produced by the method applied in Sivas province and its surroundings were investigated. For this purpose, firstly, the Uw melting device was prepared and the melting properties of the cheese curds produced were evaluated with this device. In addition, the melting behavior and the change in the chemical composition of cheese clots left to ripen in brine after dry salting were observed on the 1st, 30th, 60th and 90th days of ripening.

2. Material and Methods

2.1. Materials

In this research, milk obtained from cows and sheep raised in rural areas about 2 months after the lactation period was used as raw material. The rennet (1:8000 strengths, Yayla Süper Maya) and salt used in cheese making were obtained from local markets.

Cow and sheep milk were mixed in a 1:1 ratio and brought to 45°C. Without calculating the amount of enzyme to be added to the milk, it was added as much (10 ml) as the amount of continuous production by the people who produce at home. After the enzyme-added milk was coagulated at 40°C, the curd was cut and the curd was boiled at two different temperatures (55°C, 65°C) and three different times (1 min, 6 mins and 11 mins). After the cooking process, the bagged clots were left to be suppressed at approximately 40°C. The curds from which the whey was separated were dry salted and kept for 24 hours, then left to mature in the prepared brine (14% salt) at 15°C for 3 months (Figure 1).

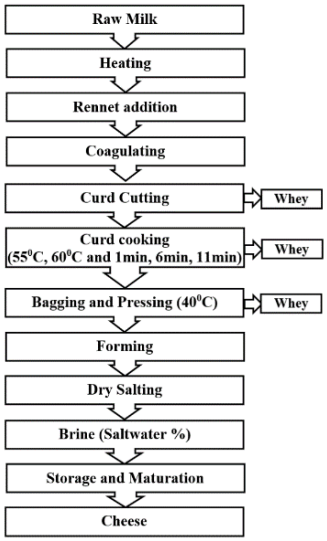


Figure 1. Traditional cheese production flow chart.

2.2. Methods

2.2.1. Physical and chemical analysis of milk and cheese samples used in cheese making

pH, protein, fat, salt, dry matter, water-soluble nitrogen, and water activity analyses were performed on the 1st, 30th, 60th and 90th days following curd and ripening. The dry matter content of curd and cheese was measured gravimetrically (TS, 2006), salt content according to the Mohr method (Hayaloglu et al., 2011) and fat content using Funke-Gerber cheese butyrometers according to the Van Gulik method according to TS 3433. Protein content was measured with Kjeldahl according to the AOAC method (AOAC, 1990). While determining the water-soluble nitrogen content of cheeses and curds, the extract was prepared according to the method of Kuchroo and Fox (1982). The pH of the cheeses was determined potentiometrically by the WTW brand Inlab Level-1 model pH meter with a glass electrode directly. By immersing the

electrode directly into the cheese, the average of the values measured from 3 different points was taken. The water activities of the produced curd and cheese were determined at 25°C with an electronic Novasina Labmaster-aw water activity determination device. Color analysis was performed using the Chroma Meter (Minolta, model CR300, Minolta Camera Company, Osaka, Japan). Results are explained according to L*, a* and b* parameters. Before measurements, the instrument was calibrated with a reference white layer (Voss, 1992; Martley and Michel, 2001). All analyses were performed in 2 parallel.

2.2.2. Melting behavior

To determine the melting behavior of the produced curd and cheese, first, a melting profile device, which is like the device that gives the melting profile developed by the University of Wisconsin, can read and monitor the instant level and temperature changes in the heated cheese mass and report the level-temperature relations at desired time intervals has been prepared. In the device, it is ensured that the data collection unit communicates with the personal computer with an appropriate protocol, the data is recorded from the database and monitored on the screen with an interface software. LVDT level sensor, whose frequency changes according to the height change, was used to measure the level, and a T-type thermocouple was used to measure the temperature. Cheese samples were cut with the help of a steel cylinder with a diameter of 3 cm and a height of 0.7 cm and the surfaces of the samples were lubricated with mineral oil (Figure 2). Then, the melting behavior was investigated in the melt analyzer at 70°C. The cheese melting profile (Figure 3) was drawn with the data obtained because of the melting analysis.



Figure 2. The designed melt profile device and the cut cheese sample.

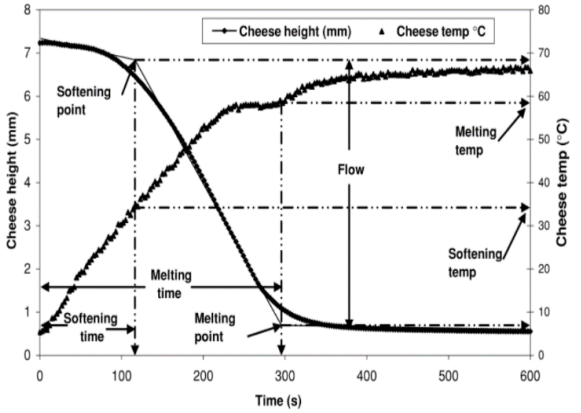


Figure 3. Cheese melting profile (Gunasekaran and Ak., 2003).

Melting initiation temperatures (TEB), flowability and average flow rates (OAO) of cheeses were calculated from the melting profile drawn separately for each cheese. The melting initiation temperature was read from the cheese sample temperature column in the drawn melting profile. The mean flow rate was calculated as the maximum value of the slope of the line connecting the melting temperature (TEB) and the melting termination temperature (TES) in the melting curve. The mean flow rate was calculated as the maximum value of the slope of the line connecting the melting temperature (TEB) and the melting termination temperature (TES) in the melting curve. The average flow rate is an estimate of the meltability of the cheese (Gunasekaran and Ak., 2003). The flowability degrees of the cheeses were calculated according to Chevanan and Muthukumarappan (2007) using the following equation.

$$\text{Flowability (\%)} = \frac{\text{Cheese initial height} - \text{Cheese final height}}{\text{Cheese initial height}} \text{X100} \quad (1)$$

2.3. Statistical Analysis

The effects of the factors used in the research (ripening time, scalding temperature and scalding time) on the dependent variables were analyzed at $P<0.05$ level with variance analysis by applying the Statistica package program (1995). If the variance analysis results were found to be significant, the difference between which groups were determined by applying the least significant difference (LSD) test from multiple comparison tests ($P<0.05$).

3. Results and Discussion

In the study, some chemical properties of the mixture of sheep and cow milk used for cheese production were determined because of the analyzes and the fat content was determined as 5.8 g/100g, protein content 3.88g/100g, dry matter content 13.86 g/100g, pH value 7.8 calculated.

It was found that the dry matter contents of the curds produced by applying two different cooking temperatures and three different cooking times ranged between 50.41-54.55%, respectively, and the effects of cooking time,

cooking temperature and the interaction of these factors on the dry matter content of curds were found to be statistically significant (P<0.05) (Table 1).

High-temperature application increases the flocculation of the paracasein micelles and facilitates the removal of water in the structure, that is, it increases syneresis (Metin, 2008). When the cooking temperature of the curds produced increased, the syneresis and thus the amount of water separated from the structure increased, causing the dry matter content of the curds cooked at 65°C to be higher than those cooked at 55°C. The increase in the cooking time at both cooking temperatures also increased the dry matter content. This change in the dry matter content of the curds depending on the cooking time was associated with syneresis and the increase in the applied cooking time led to an increase in the amount of water separated from the structure and thus the amount of dry matter.

It was determined that the dry matter content of the ripened cheeses increased in the 1-30 days of ripening and fluctuated between the 30-90 days. When the dry matter contents of curd and 1st day cheeses were compared, the dry matter contents of 1st day cheeses were higher than that of curds at each cooking temperature and time. This difference in the dry matter content of the 1st-day cheeses stored in curd and brine resulted from the displacement of water and salt in the mass with salting in the 1st day cheeses. The passage of salt into cheese is by diffusion. While salt diffuses into the cheese, the water in the cheese comes out and the cheese loses water (Walstra, 1999; Fox et al., 2000). Therefore, the diffusion of salt into the cheese mass increased the dry matter content in the cheese samples on the 1st day of storage.

Table 1. Average values of the chemical and physicochemical properties of the produced curd and cheese

Ripening time (day)	Cooking time (min)	Cooking temperature (°C)	Dry matter (%)	Fat (%)	Fat in dry matter	Protein (%)	Protein in dry matter	Salt (%)	Salt in dry matter	Water soluble N (%)	pH	a_w	L value
0	1	55	50.41	25.00	49.61	23.41	46.65	0.94	1.86	0.13	5.76	0.98	89.89
0	6	55	51.21	23.00	44.91	23.03	44.97	1.17	2.28	0.23	5.76	0.96	89.16
0	11	55	52.84	25.00	47.31	24.66	46.67	1.17	2.21	0.20	5.82	0.96	88.99
0	1	65	52.92	25.00	47.24	23.97	45.30	0.94	1.77	0.08	5.81	0.97	87.57
0	6	65	50.41	23.00	45.63	23.12	45.87	0.94	1.86	0.27	5.92	0.96	88.74
0	11	65	54.55	26.00	47.67	25.70	47.12	1.17	2.14	0.25	5.91	0.97	87.27
1	1	55	52.34	23.00	43.89	23.92	45.75	3.36	6.63	0.03	5.80	0.87	87.30
1	6	55	56.34	26.05	46.26	23.42	41.59	4.33	7.65	0.24	5.71	0.85	86.78
1	11	55	56.39	26.00	46.10	24.15	42.84	3.98	7.06	0.33	5.67	0.81	87.11
1	1	65	59.83	26.00	43.46	26.43	44.18	5.56	9.29	0.10	5.71	0.85	87.74
1	6	65	53.38	23.00	43.04	22.92	42.96	4.97	9.32	0.27	5.87	0.86	87.08
1	11	65	58.79	24.00	40.89	27.15	46.22	5.41	9.14	0.25	5.90	0.88	86.56
30	1	55	67.45	28.00	41.15	30.98	45.93	6.87	10.19	0.27	6.15	0.85	87.06
30	6	55	66.28	29.50	44.40	27.83	41.99	6.73	10.15	0.26	6.00	0.84	87.94
30	11	55	66.63	29.00	43.52	28.02	42.05	7.31	10.97	0.32	6.06	0.79	86.14
30	1	65	63.93	27.00	42.22	27.37	42.80	7.17	11.21	0.20	6.02	0.84	88.09
30	6	65	67.14	30.00	44.67	27.61	41.14	7.75	11.55	0.39	6.01	0.85	86.74
30	11	65	68.08	29.50	43.33	28.41	41.73	8.04	11.81	0.22	6.09	0.85	86.22
60	1	55	63.28	27.00	42.67	26.81	42.37	7.17	11.32	0.23	5.35	0.94	88.50
60	6	55	67.78	29.50	43.52	28.14	41.52	7.46	11.00	0.22	5.20	0.93	87.33
60	11	55	66.68	30.00	44.94	26.58	39.90	7.90	11.85	0.32	5.18	0.92	86.88
60	1	65	63.27	26.00	41.08	26.72	42.23	8.04	12.72	0.16	5.23	0.91	87.86
60	6	65	65,25	29.00	44.10	26.48	40.28	8.34	12.68	0.23	5.34	0.90	87.00
60	11	65	68.72	30.00	43.66	27.88	40.57	8.92	12.98	0.25	5.52	0.91	86.48
90	1	55	61.95	26.00	41.97	26.93	43.47	7.17	11.57	0.24	5.34	0.92	88.54
90	6	55	61.89	26.00	42.02	27.00	43.63	7.31	11.82	0.26	5.20	0.92	87.27
90	11	55	64.32	28.50	44.31	25.98	40.39	7.90	12.28	0.38	5.11	0.89	86.76
90	1	65	69.18	30.00	43.35	29.32	42.39	7.90	11.41	0.29	5.34	0.92	87.66
90	6	65	66.02	27.50	41.65	28.20	42.71	8.34	12.63	0.32	5.38	0.89	86.98
90	11	65	69.40	29.00	41.69	29.46	42.45	9.07	13.07	0.14	5.19	0.91	87.28

When the effects of cooking time, cooking temperature and ripening time on dry matter content were examined, the effects of single, double, and triple interactions of factors on dry matter were found to be statistically significant (Table 2).

When the storage period increased from the 1st to the 30th day, a sudden increase in the dry matter content of the cheeses was observed at each cooking temperature and time, and on the 30th, 60th and 90th days of storage, the dry matter content of the cheeses increased and decreased depending on the cooking temperature (Table 2). The sudden increase in the dry matter content of cheeses between the 1st and 30th days was associated with the continuation of salt diffusion, 30.-90. It was thought that the increase and decrease between the days were due to the biochemical changes that took place during the ripening of the cheeses (Fox and McSweeney, 2017).

Dagdemir et al. (2003) examined the effect of using different starter cultures on the properties of white cheese and Gursoy (2005) studied the use of some probiotic bacteria as a support culture in the production of white cheese.

Milk fat, which is one of the most important components of milk, is important in terms of nutrition and economy as

well as its effect on cheese taste, aroma and texture. When the analysis results of the fat contents of the curd and cheese samples and the fat values calculated over the total dry matter are examined, the fat content of the curds in dry matter varies between 44.91-49.61%, and in general, the fat content of the curds cooked at 55°C is found to be at 65°C. It was observed that it was higher than the cooked curd (Table 1). However, when the effect of the factors on the fat content of the curds in dry matter was analyzed by analysis of variance, it was determined that the effect of cooking temperature alone was not statistically significant, and the cooking temperature x cooking time interaction was significant (Table 2). Therefore, the increase in the boiling time together with the cooking temperature caused some of the fat in the mass to melt and go out of the mass.

Table 2. Effect of factors on chemical and physicochemical properties of curds

Factors	dF	Dry matter		Fat in dry matter		Protein in dry matter		Salt in dry matter	
		MS	F	MS	F	MS	F	MS	F
Cooking temperature (1)	1	5.812	21.705***	0.824	3.511	0.196	0.905	0.171	306.89***
Cooking time (2)	2	13.196	49.280***	15.727	67.028***	3.411	15.765**	0.213	381.12***
1x2	2	4.493	16.778***	4.265	18.176**	1.753	8.101**	0.061	109.22***
Factors	dF	Salt		a_w		Water soluble N		L value	
		MS	F	MS	F	MS	F	MS	F
Cooking temperature (1)	1	0.027	325.28***	0.0000	0.50	0.001	1012.50***	0.46	0.36
Cooking time (2)	2	0.821	975.85***	0.000171	171.50***	0.371	3714.62***	8.28	6.46**
1x2	2	0.027	325.28***	0.000142	141.50***	0.044	4378.79***	0.23	0.18

* P<0.05; ** P<0.01; *** P<0.001; dF= degrees of freedom; MS= mean of squares

When the % fat content of cheeses ripened in brine was examined, it was found that it varied between 23% and 30% (Table 1) and the % fat content of cheeses cooked at 65°C on the 1st day of ripening was lower than those of samples cooked at 55°C. On the 30th and other days of ripening, although there was a difference in the % oil content depending on the cooking time at both cooking temperatures, the effect of the cooking temperature on the % oil content was not observed (Table 1).

Considering the fat content in dry matter of cheese samples ripened in brine, it was observed that there were significant increases and decreases in % fat content during ripening. The fat content in dry matter of cheeses cooked at 65°C on the 1st day of ripening was found to be lower than those cooked at 55°C. This was due to the lower dry matter content of curds cooked at 65°C than those cooked at 55°C.

As a result of the analysis of variance, it was found that the effect of cooking temperature alone on the fat content in dry matter of cheeses was not significant, similar to the one in curd, but the effect of the other factors individually and the double and triple interactions of all factors were significant (Table 3). The significant effect of cooking temperature x cooking time interaction resulted in lower dry matter fat content of cheeses cooked at 65°C than those cooked at 55°C. After the first day of ripening, the fat content of the cheeses showed fluctuations depending on the increase in dry matter content and the biochemical changes in the ripening time.

Protein content, which is one of the dry matter components of cheese, is the most important component in the formation of cheese gel (Chai et al., 2024). While the protein content of the produced curds varied between 23.03-25.70%, the protein content in the dry matter ranged between 44.97-47.12%. It was observed that the protein content of curds in dry matter was generally lower in curds cooked at 55°C than those cooked at 65°C (Table 1). It was determined that the effect of cooking temperature alone on the protein content of curds in dry matter was not statistically significant, but its interaction with time was significant (Table 2). The increase in the cooking time together with the cooking temperature caused some of the fat in the mass to melt and come out, thus increasing the protein content in the dry matter. Considering the protein content of cheeses ripened in brine, it was observed that it varied between 22.92% and 30.98% (Table 1). The % protein content of the cheeses cooked at 65°C on the 1st day of ripening was found to be higher than those of the samples cooked at 55°C. However, increases and decreases were observed in the % protein and dry matter protein content of the ripened cheeses during the ripening period (Table 1). As a result of the analysis of variance, it was found that the effect of cooking temperature on the protein content of cheeses in dry matter was not statistically significant, like the one in curd, but the effect of the double and triple interactions of other factors individually and of all factors was significant (Table 3). After the first day of ripening, the protein content of cheeses in dry matter changed depending on the fluctuation in % fat content, the increase in dry matter content and the biochemical changes in the ripening period.

Cheeses should be matured under certain conditions to provide their unique flavor, color, taste, consistency, and porosity. Water-soluble nitrogen is also evaluated as an indicator of ripening and proteolysis (Oztek, 1994). When Table 1 is examined, the water-soluble nitrogen value for the curds varies between 0.08-0.27%, while the water-soluble nitrogen values of the cheeses ripened in brine are calculated between 0.03-0.39%. The effects of cooking temperature, cooking time and the interaction of these two variables on the water-soluble nitrogen contents of the curds were found to be statistically significant (Table 2). In general, increasing the cooking temperature and time increased the amount of water-soluble nitrogen. Although the water-soluble nitrogen content of the

cheeses fluctuated during ripening, the water-soluble nitrogen content of the cheeses increased with the prolongation of the ripening time in both cooking temperatures. In addition, the effects of cooking time, cooking temperature, ripening time and the double and triple interactions of these three factors on the water-soluble nitrogen content were found to be statistically significant (Table 3). As expected, the amount of water-soluble nitrogen in the cheeses increased as the ripening time increased. Akbulut et al. (1996) determined the applicability of some salting methods in white cheese production and their effects on cheese quality and stated that the amount of water-soluble nitrogen increased significantly during storage. In the study, although there was a general increase in the amount of water-soluble nitrogen depending on the ripening time, this increase differed depending on the cooking time and temperature. Oner et al. (2006) in their study on Turkish white cheese determined that the amount of water-soluble nitrogen varied between 0.21-0.36% during ripening and the amount of water-soluble nitrogen increased with the ripening time. The values obtained in the study and the values obtained by the researchers show similarity.

Table 3. Effects of factors on the chemical and physicochemical properties of ripened cheeses

Factors	dF	Dry matter		Fat %		Fat in dry matter		Protein %		Protein in dry matter	
		MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F
Cooking temperature (1)	1	61.52	52.15***	0.75	1.98	17.96	16.62***	8.38	503071***	0.39	0.63
Ripening time (2)	3	436.86	370.27***	66.25	174.92***	6.09	5.63**	48.02	28881117***	23.16	37.81***
Cooking time (3)	2	33.41	28.32***	15.98	42.19***	10.23	9.47***	5.28	316567***	21.60	35.25***
1x2	3	32.81	27.81***	6.82	18.02***	8.49	7.86***	11.72	703521***	4.72	7.70***
1x3	2	15.36	13.02***	4.95	13.07***	8.48	7.85***	8.85	531254***	13.17	21.50***
2x3	6	9.09	7.71	6.46	17.05***	5.16	4.78***	3.13	187546***	5.69	9.29***
1x2x3	6	15.49	13.13***	5.70	15.05***	2.78	2.57*	2.91	174793***	1.85	3.03*
Factors	dF	Salt		Salt in dry matter		Water soluble N		a_w		L value	
		MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F
Cooking temperature (1)	1	18.06	85.88***	29.99	57.84***	0.01	9173.35	0.00	351.13***	0.46	0.30
Ripening time (2)	3	46.06	219.01***	62.95	121.43***	0.02	19919.710***	0.03	28030.79***	0.62	0.41
Cooking time (3)	2	2.68	12.75***	2.37	4.56*	0.06	57459.05***	0.00	1447.63***	8.28	5.43**
1x2	3	0.43	2.04	2.31	4.46**	0.00	3147.70***	0.00	2127.13***	0.24	0.16
1x3	2	0.06	0.29	0.05	0.09	0.05	52536.85***	0.00	5045.38***	0.23	0.15
2x3	6	0.17	0.79	0.56	1.09	0.02	18487.44	0.00	109.29***	0.51	0.34
1x2x3	6	0.38	1.79	0.39	0.76	0.01	9544.36***	0.00	535.38***	0.95	0.62

* P<0.05; ** P<0.01; *** P<0.001; dF= degrees of freedom; MS= mean of squares

Salting is one of the important stages of cheese making. With salting, unique taste, aroma, structure, appearance, etc. qualities are formed (Kosikowski, 1978). The salting process in cheeses is done by adding salt (NaCl) directly to the cheese milk, adding it to the curd or curd, sprinkling the cheese from the outside (dry salting) or keeping the cheese in brine. The brine salting technique is used for the salting of white cheeses (Guven et al., 2003; Ucuncu, 2005). The salting process was applied to the produced curds by combining dry salting and salting in brine. The salt content of the curds varied between 0.94-1.17% and the difference in salt content was due to the difference in the dry matter content of the curds. During the ripening period, the % salt content of the cheeses varied between 3.36% and 9.07%, and the salt content in dry matter ranged between 6.43-13.07% (Table 1). The salting process was applied to the produced curds by combining dry salting and salting in brine. The salt content of the curds varied between 0.94-1.17% and the difference in salt content was due to the difference in the dry matter content of the curds. During the ripening period, the % salt content of the cheeses varied between 3.36% and 9.07%, and the salt content in dry matter ranged between 6.43-13.07% (Table 1). The effects of ripening time, cooking time, cooking temperature and ripening time x cooking temperature on the salt content in dry matter of cheeses were found to be statistically significant (Table 2). In the produced cheeses, the salt % salt and dry matter content of the cheeses boiled at 65°C during ripening were higher than those boiled at 55°C. An increase was observed in the dry matter and salt content of cheeses at both cooking temperatures between the 1st and 30th days of ripening. At each cooking temperature, the dry matter and salt content of cheeses were between 30-90. Although a slight increase was observed between the three days of the week, it was determined that this increase was not statistically significant (P>0.05) with the LSD test performed because of the analysis of variance. Uraz and Gencer (2000) in a study on salt intake in white cheese, stated that the salt content varied between 6.03-7.03 %. In our study, it was thought that this difference in salt content was due to factors such as dry salting, holding in brine, salt in brine and composition of the cheese.

The pH value in milk and dairy products is composed of compounds such as free basic compounds in equilibrium with free and active hydrogen ions, acidic and basic

groups attached to protein, free organic acids and free neutral buffer compounds (Gursoy, 2005). The pH value is used as a criterion in explaining the physical, chemical and microbiological changes in cheese technology (Gider, 2006). The pH values of each produced curd and cheese in the 90-day ripening period were measured from three different regions of the curd and cheese, and these values are given in Table 1. While there was no significant difference between the pH values of curd and 1st day of ripening cheeses at each cooking temperature and time, the pH value of cheeses increased from the 1st to the 30th day of ripening, but the pH values of the cheese samples decreased after the 30th day of ripening. Although the pH values of cheeses cooked at 55°C were higher than the pH values of cheeses cooked at 65°C, the change in pH during storage at both cooking temperatures showed parallelism. Similar to the findings of our study by Celikbilek (2010) pH values increased from the first day of ripening to the 15th day and decreased after the 15th day.

Water activity is defined as the ratio of the vapor pressure of water in foods to the vapor pressure of pure water at the same temperature (Rödel, 2001). Although it varies according to the type, the water activity (a_w) in cheese generally varies between 0.87-0.98. The a_w values of curds and cheeses ripened in brine at each cooking temperature and time are given in Table 1. According to the table, the a_w values of the curds varied between 0.96-0.98, while the a_w values of the cheeses varied between 0.81 and 0.94. The salting process has an accelerating effect on the change of water activity, and an increase in salt concentration decreases a_w. When the water activities of the curds and the water activities of the 1st day cheeses are compared, it is seen that the a_w values of the 1st day cheeses are lower than the curds (day 0). It was thought that this situation was caused by the diffusion of salt into the cheese mass with dry salting and brine salting, and the reduction of water activity by binding the water to the salt. With the analysis of variance, the effects of cooking temperature, cooking time, ripening time and the double and triple interactions of these three variables on a_w were found to be statistically significant (Table 3). In general, increasing the cooking time decreased the water activity, while increasing the cooking temperature increased the water activity.

Features such as color, aroma and texture of food are parameters that play an important role in consumer preference and acceptability. Color, which is the first feature to be noticed in all foodstuffs, is closely related to the internal and external quality criteria of the food, and therefore color measurements are important for foods (Yetim and Kesmen 2008). Fat globules and casein micelles in milk play a major role in the white color of cheese because they reflect light in the visible spectrum. While the amount of fat before cooking ensures that the color of the cheese is white, the serum proteins separated by the cooling of the cheese after cooking prevent the reflection of light and reduce the whiteness of the cheese. For this reason, the L* value is important in terms of expressing the whiteness of cheese (Metzger et al., 2000). As seen in Table 1, the L* values of the curds varied between 87.27-89.89, while the L* values of the cheeses ripened in brine for 90 days varied between 86.22-88.54. The effect of the factors on the L* value of cheese was determined by analysis of variance and only the effect of cooking time was found to be statistically significant (Table 3). The increase in the cooking time during the ripening period caused a decrease in the L* value of the cheeses. This was due to the fact that the serum proteins, which separated with the increasing cooking time, prevented the reflection of light and reduced the whiteness of the cheese. Although the effect of cooking temperature on the L value of cheeses is not statistically significant, the L* values of cheeses cooked at 55°C were higher than those cooked at 65°C (Table 1). In many studies, it is stated that the change in the L* value is due to the fat content of the cheeses (Kahyaoglu et al., 2005) but in our study, it was observed that there was no change in the fat content of the cheeses, since the milk used as raw material was the same in all cheese varieties. Therefore, it was determined that the change in L* value changed independently of the oil content.

Since the proteolytic activity of the enzymes continues during the 90-day ripening period in brine after the production stage and because salting causes changes in the cheese structure, as well as in the evaluation of the chemical and physicochemical properties, the evaluation of the cheese ripened in curd and brine is handled separately.

When cheese is heated, many internal changes such as melting, flowing, softening and elongation are observed. As with all other substances, there is a transition from a solid-like state to a liquid-like state in the melting that occurs in cheese. Fat is the only solid that can truly melt in cheese, and milk fats are completely liquid at about 40°C. Proteins do not dissolve, but changes occur in the interactions of proteins with each other and this is called melting. Melting is the cheese's ability to flow and spread, and the cheese softens before it starts to flow. Flowing occurs when sufficient pressure or thermal energy is applied to the softened cheese (Lucey et al., 2003).

The softening of the cheese is expressed by the temperature at the moment of transition to flow (Chevanan and Muthukumarappan, 2007; Ko, and Gunasekaran, 2008) and this temperature is defined as the melting initiation temperature (TEB) in our study. When the melting initiation temperatures obtained from the melting profile of each curd and the ripened cheeses were examined, it was seen that the melting initiation temperatures of the curds varied between 45.66°C and 51.98°C (Table 4).

When the effect of cooking temperature and time on the melting temperature of the curd samples was examined by variance analysis, only the effect of cooking temperature was found to be statistically significant (Table 5). Increasing the cooking temperature increased the melting initiation temperature of the curds. As the high-

temperature application increases the rate of water leaving the structure, protein-protein interactions increase. In this case, since the structure of the curds cooked at 65°C becomes tighter than the ones cooked at 55°C, their melting becomes more difficult and therefore their melting start temperature increases. When the melting initiation temperatures of the ripened cheeses are examined in Table 4, it is seen that it varies between 41.80-51.79°C and when the effect of the factors on the melting initiation temperatures of the cheeses is analyzed by analysis of variance, the effects of ripening time, cooking temperature and cooking time are found to be statistically significant (Table 6). With the increase of the applied cooking temperature, the melting initiation temperature increased as in the curds. In addition, the melting temperature of the cheeses decreased with the increase in the ripening time at each cooking temperature and time.

Melting initiation temperatures of the curds were lower at each cooking temperature and time compared to the 1st and 30th day cheeses. This difference between melting initiation temperatures of cheeses ripened in curd and brine is related to salting. Although salt is a secondary component in cheese, it has a primary effect on the properties of meltable and non-meltable cheeses. With the decrease of hydration in paracasein at high salt concentration, salt-out effect; It has been stated that at low salt concentration, the increase in paracasein hydration may result from the salt-in effect (Paulson et al., 1998). Fat is the only solid that can truly melt in cheese, and milk fats are completely liquid at about 40°C. Milk proteins, on the other hand, do not dissolve, but changes occur in the interactions of the proteins with each other and this is called melting.

A firmer cheese structure is formed as a result of the replacement of the Ca^{+2} ion and Na^{+1} ion in the casein structure, called Ca-para-caseinate, in cheese together with salt, and the increase in fat emulsion in the protein matrix (Kindstedt et al., 1992). Thus, the cheese is both harder and harder to melt.

The fact that the melting initiation temperatures of the cheeses were high on the 1st and 30th days of ripening caused an increase in the interaction between paracasein molecules and the thermal energy level that could cause a change in this interaction due to the effect of salting, thus increasing the melting initiation temperature. Whereas, the melting initiation temperatures of the cheeses decreased between 30-90 days. It is thought that this decrease may be due to the increase in the strength of the hydrophobic interactions between the casein molecules, the decrease in the contact area between the casein particles, and therefore the decrease in the durability of the gel structure, as a result of the more homogeneous distribution of the salt in the mass due to the increase in the salt content and salting time.

The degree of flowability is expressed as the percentage decrease in cheese height during melting (Chevanan and Muthukumarappan, 2007). The flowability degrees of the curd and cheese produced by applying different scalding temperatures and scalding times are given in Table 4 and it has been seen from the table that the flowability degrees of the curds vary between 32.78% and 53.35%. The effect of cooking temperature and duration on the flowability of curds was examined by analysis of variance and it was found that the effect of cooking temperature and cooking time was statistically significant (Table 5). With increasing cooking temperature, the degree of flowability also decreased. The effect of cooking temperature on the flowability of curds was associated with the increase of protein-protein interactions due to the increase in the rate of water leaving the structure, at high cooking temperature. The water leaving the structure with high-temperature application causes the structure to become tighter and it becomes difficult to flow (Udayarajan and Lucey, 2005). Therefore, curds cooked at 65°C are harder than those cooked at 55°C, since more water is separated from the structure with the effect of high temperature; thus, their flowability became more difficult. Likewise, increasing the cooking time also increased the amount of water separated from the structure and strengthened the intermolecular bonds, and the flowability of the curds decreased in general due to the increase in the cooking time.

Table 4. Average values of melting properties of curd and cheese produced

RT (day)	CTime (min)	CT (°C)	FD (%)	SP (°C)	AFR (mm/sec)
0	1	55	53.35	45.66	22.45
0	6	55	43.92	45.96	20.55
0	11	55	48.12	47.93	19.85
0	1	65	48.34	48.78	21.60
0	6	65	32.78	49.65	11.95
0	11	65	47.45	51.98	15.25
1	1	55	34.89	48.89	2.80
1	6	55	33.18	41.72	2.60
1	11	55	30.99	49.99	2.15
1	1	65	34.53	50.09	2.70
1	6	65	27.45	46.19	1.90
1	11	65	26.92	51.05	1.75
30	1	55	25.86	48.40	2.20
30	6	55	24.10	40.70	1.65
30	11	55	18.14	44.54	1.25
30	1	65	25.71	42.41	2.00
30	6	65	28.08	49.69	1.90
30	11	65	27.10	50.66	2.70
60	1	55	30.06	41.75	2.15
60	6	55	27.06	44.11	1.85
60	11	55	15.50	42.90	1.20
60	1	65	21.20	43.45	1.65
60	6	65	16.21	47.69	1.15
60	11	65	14.45	46.69	1.05
90	1	55	29.32	41.80	2.05
90	6	55	23.15	42.75	1.60
90	11	55	13.33	48.54	1.35
90	1	65	27.70	43.68	1.85
90	6	65	17.18	47.50	1.00
90	11	65	26.92	40.21	1.60

RT= ripening time, Ctime= cooking time, CT= cooking temperature, FD= flow degree, SP= softening point, AFR= average flow rate

Table 5. Effect of factors on the variables of melting behavior of curds

Factors	dF	Flow degree		Softening point		Average flow rate	
		MS	F	MS	F	MS	F
Cooking temperature (1)	1	94.27	11.75*	39.27	5.85	0.21	0.71
Cooking time (2)	2	169.68	21.16**	8.30	1.23	1.39	4.61*
1x2	2	27.72	3.46	0.22	0.03	0.57	1.88

P<0.05; ** P<0.01; *** P<0.001; dF= degrees of freedom; MS= mean of squares.

The effect of existing factors on the flowability of ripened cheeses was investigated by analysis of variance, the effect of boiling temperature alone was insignificant; The effect of ripening time, cooking time, cooking temperature x cooking time interaction and cooking temperature x ripening time interaction were found to be statistically significant (Table 6). The increase in cooking time and ripening time caused a decrease in the flowability of the cheeses. The decrease in the flowability of the cheeses due to the increase in the ripening time at each cooking temperature was associated with the increase in the salt content of the cheeses, as well as the increase in the melting temperature. In addition, when the flowability degrees of the produced curds were compared with the 1st-day cheeses of ripening, the flowability of the curds was higher than the 1stday cheeses at each cooking temperature and time, as well as the melting initiation temperatures. The decrease in the solubility level of the first-day cheeses was associated with the decrease in the oil level that can be separated from the structure with the increase in the apparent viscosity as a result of the increase in the salt content in the cheese mass, and the decrease in the protein hydration as a result of the pure out effect.

The average flow rate is calculated as the slope in the region where the flow occurs in the melt profile and is expressed in mm/sec. (Gunasekaran and Ak, 2003). The average flow rates of the curds were similar to the

flowability degrees and the increase in the cooking temperature caused a decrease in the average flow rates of the curds (Table 4). This showed that the melting behavior of curd cooked at 55°C was better than at 65°C. In addition, the increase in the cooking time in both cooking temperatures caused a decrease in the average flow rate of the curds. Since the increase in cooking temperature and time causes a decrease in the amount of water in the mass of the curds and there is no significant difference between the % oil content of the curds, the flow rates of the curds produced decreased with the increasing cooking temperature and time.

The average flow rates of cheeses produced by applying different cooking temperatures and cooking times during ripening, which is another of the melting parameters, varied between 1.00mm/sec and 2.80mm/sec (Table 4). The effect of factors on the average flow rates of cheeses during ripening was examined by analysis of variance and the effect of the interaction of cooking time, ripening time and cooking temperature x ripening time was found to be statistically significant (Table 5). In both cooking temperatures, the average flow rate of the cheeses decreased with the increase in the cooking time in general. It is thought that this change in the average flow rates of cheeses depending on the ripening time in the applied cooking temperature and durations, as well as in the other melting parameters of the cheeses (melting initiation temperature and flowability degree), is caused by salt diffusion and biochemical changes that occur during ripening. When the produced curd and 1st day cheeses were compared, the average flow rates of the curds were higher than the 1st day cheeses at all cooking temperatures and times. The passage of salt into cheese is by diffusion. As the salt diffuses into the cheese, the water in the cheese also goes out and the cheese loses water (Walstra et al., 1999; Fox et al., 2000). Dry salting of the curd, followed by brine salting, and the salt diffused into the cheese mass caused the interaction between casein molecules to increase. With the increase in the interaction between the casein molecules, the mass became tighter and harder. Therefore, since the mass structures of the 1st day cheeses ripening are firmer and harder than that of the curds, the average flow rates were also lower than that of the curds.

Table 6. Effect of factors on the variables related to the melting behavior of ripened cheeses

Factors	dF	Flow degree		Softening point		Average flow rate	
		Mean of squares	F	Mean of squares	F	Mean of squares	F
Cooking temperature (1)	1	2.03	0.08	82.32	28.53***	0.21	1.27
Ripening time (2)	3	257.01	10.80***	39.32	13.63***	1.68	9.97***
Cooking time (3)	2	156.77	6.59**	31.95	11.07**	1.39	8.25**
1x2	3	107.08	4.50*	20.40	7.07**	0.57	3.42*
1x3	2	147.99	6.22**	25.17	8.72**	0.57	3.36
2x3	6	29.81	1.25	27.19	8.73***	0.14	0.84
1x2x3	6	30.87	1.30	12.89	4.47**	0.17	1.01

4. Conclusion

In Türkiye, various local cheeses are produced according to the local conditions, cultural habits, animal breeds and species and production differences of each region. Examining and developing the production technologies of local cheeses will both increase the production of cheese at the industrial level and contribute to the increase in cheese variety and consumption.

This study aims to standardize the boiling stage of the cheese, which is produced in the province of Sivas and its surroundings in the Central Anatolian region of Türkiye, and which gains importance in consumer preference despite being called white cheese. For this purpose, 6 different clots were prepared by applying the temperature of 55 °C and 65 °C and the cooking time of 1, 6 and 11 minutes during the cooking phase of cheese production. The produced curds were matured for 90 days in dry salting and then in 14% brine, and the effects of cooking temperature and duration on curd, cooking temperature, duration and ripening time on the physical, chemical and melting behavior of cheeses were investigated.

Cooking temperature × cooking time and cooking temperature × ripening time were effective on the melting behavior of cheeses. Although the prolongation of the ripening period affects the melting behavior negatively, it has been observed that the melting behavior of the cheeses produced by cooking the curd at 55°C is better than that of the cheeses cooked at 65°C during the whole ripening process. In addition, the increase in the cooking temperature and the prolongation of the cooking time caused an increase in the salt content of the cheese and thus a decrease in the melting behavior of the cheese. When all the findings obtained in the study are evaluated together, the application of curd cooking temperature of 55°C and cooking time of 6 minutes will improve the melting behavior of cheese and increase consumer preference.

Author Contributions

The percentages of the authors' contributions are presented below. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

	E.B.B.	N.D.I.
C	50	50
D	80	20
S	50	50
DCP	70	30
L	70	30
W	80	20
CR	50	50
SR	100	
PM	50	50
FA	100	

C= concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans.

Acknowledgments

This study was supported by Sivas Cumhuriyet University Scientific Research Unit as a master thesis (Project Code: M-449).

References

Akbulut N, Gonc S, Kınık O, Uysal H, Akalın S, Kavas G. 1996. A study on the applicability of some salting methods in white cheese production and their effects on cheese quality: II. Effects on chemical properties. J Ege Univ Fac Agri, 33: 9-15.

AOAC. 1990. Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemists, Washington, USA, pp: 154.

Arnott DR., Morris HA, Combs WB. 1957. Effect of Certain Chemical Factors on the Melting Quality of Process Cheese1.J Dairy Sci, 40(8): 957-963.

Cai H, Bijl E, Sala G, Scholten E. 2024. Relationship between the perception of complex textural attributes and the bolus properties of cheese. Food Hydrocol, 150: 109713. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109713

Çelikbilek İ. 2010. The effects of pasteurization process and coagulation time on the properties of Sıkma cheese. Master's thesis, Çukurova University, Institute of Science, Department of Food Engineering, Adana, Türkiye pp:45.

Chevanan N, Muthukumarappan K. 2007. Effect of calcium and phosphorus residual lactose and salt-to-moisture ratio on the melting characteristics and hardness of cheddar cheese during ripening. J Food Sci, 72(4): 168-176. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00330.x

Dağdemir E, Çelik S, Özdemir S. 2003. The effects of some starter cultures on the

Everett DW, Auty Mark AE. 2008. Cheese structure and current methods of analysis. Int Dairy J, 18(7): 759-773. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.03.012

Fox PF, McSweeney LHM, Cogan TM, Guniee TM. 2000. Post coagulation treatment of rennet milk jel. Fundamentals of Cheese Science Aspen Publishers, Washington, USA, pp: 138-140.

Fox PF, McSweeney PL. 2017. Cheese: an overview. Cheese, 2017: 5-21.

Gider K. 2006. Peynirlerde tuz geçişini etkileyen bazı faktörlerin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, ss: 117.

Gunasekaran S, Ak MM. 2003. Cheese rheology and texture. CRC Press Boca Raton, London, UK, pp: 299-324.

Gürsoy O, Kınık Ö. 2005. Laktobasiller ve probiyotik peynir üretiminde kullanim potansiyeller. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(3): 361-371.

Guven M, Hayaloglu AA, Karaca OB. 2003. Microbiological biochemical and physical effects of salting in brine cheese. New Trends in Dairy Industry Symposium, May 22-23, Izmir, Türkiye, ss: 341-345.

Hayaloglu AA, Topcu A, Koca N. 2011. Basics of cheese science. Sidaş Publisher, Izmir, Türkiye, ss: 489-562.

Kahyaoglu T, Kaya S, Kaya A. 2005. Effects of fat reduction and curd dipping temperature on viscoelasticity texture and appearance of Gaziantep cheese. Int Food Sci Techno, (11): 191. https://doi.org/10.1177/1082013205055002

Kindstedt PS, Kiely LJ, Gilmore JA. 1992. Variation in composition and functional properties within brine-salted mozzarella cheese. J Dairy Sci, 75(11): 2913-2921. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(92)78053-9

Ko S, Gunasekaran S. 2008. Analysis of cheese melt profile using inverse hill function. J Food Eng, (87): 266-273.

Kosikowski FV. 1978. Cheese and Fermented Milk Foods. Ithaca, New York, USA, pp: 1- 304.

Kuchroo CN, Fox PF. 1982. Soluble nitrogen in Cheddar cheese: comparison of extraction procedures.

Kwak H, Ganesan P, Hontg Y. 2011. Nutritional benefits in cheese in cheese: types nutrition and consumption. Nova Science Publisher, Warsaw, Poland, pp: 269-289.

Lucey JA, Johnson ME, Horne DS. 2003. Perspective on the basis of the rheology and texture properties of cheese. J Dairy Sci, (86): 2725-2743. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73869-7

Martley FG, Michel V. 2001. Pinkish colouration in cheddar cheese description and factors contributing to its formation. J Dairy Res, 68: 327-332.

Metin M. 2008. Dairy technology milk composition and processing. Ege University Press, Izmir, Türkiye, pp: 1-21.

Metzger RE, Barbano DM, Rudan MA, Kındstedt PS, Guo MR. 2000. Whiteness change during heating and cooling of mozzarella cheese. J Dairy Sci, 83: 1-10. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74847-8

Oner Z, Karahan AG, Aloglu H. 2006. Changes in the microbiological and chemical characteristics of an artisanal Turkish white cheese during ripening. LWT-Food Sci Technol, 39(5): 449-454. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.03.015

Oztek L. 1994. Maturation of cheese and factors affecting it cheese in all aspects. Trakya University, Tekirdağ Faculty of Agriculture Publications, Tekirdağ, Türkiye, pp: 121-137.

Paulson BM, McMahon DJ, Oberg CJ. 1998. Influence of sodium chloride on appearance functionality and protein arrangements in nonfat mozzarella cheese. J Dairy Sci, 81: 2053-2064 https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75780-7

properties of Turkish White cheese. Int. J. Dairy Technol.56(4):215-218.

Rödel W. 2001. Water activity and its measurement in food:

instrumentation and sensory for the food industry. Woodhead Publishing Series in Food Science, Berlin, Germany, pp: 453-483.

Turkish Standards (TS). 2006 Cheese and processed cheese-determination of the total solids content (Reference method). TS-5534. The Institute of Turkish Standards, Ankara, Türkiye.

Turkish Standards (TS). 2008. Determination of fat content in cheese (van gulik method). TS-3433. The Institute of Turkish Standards, Ankara, Türkiye.

Ucuncu M. 2005. Dairy and products technology. Meta Press, Izmir, Türkiye, ss: 185-358.

Udayarajan CT, Lucey JA. 2005. Use of fourier transform mechanical spectroscopy to study the melting behavior of cheese. J Texture Stud, 36(5-6): 489-515. https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2005.00029.x

Uraz T, Gencer N. 2000. Beyaz peynirde kalip buyuklugu vesalamura miktarinin tuz alimi uzerine etkisi. Turkish J Agric Forestry,24(5): 621–628.

Voss DH. 1992. Relating colorimeter measurement of plant colour to the royal horticultural society colour chart. Hort Sci, 27(12): 1256-1260. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.27.12.1256

Walstra P, Geurts TJ, Noomen A, Jellema A, Van Boekel MAJS. 1999. Dairy technology. Marcel Dekker Inc, New York, USA, pp: 541-553.

Yetim H, Kesmen Z. 2008. Gıda analizleri. Erciyes Üniversitesi Matbaası, Kayseri, Türkiye, ss: 289-303.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1601682

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 591-597 / May 2025

OPTIMISING 3D PRINT PARAMETERS FOR L-JOINT STRENGTH USING TAGUCHI METHOD

Aleyna TAŞKIN[1], Cengiz Görkem DENGİZ[1*]

[1]*Ondokuz Mayıs University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engieering, 55139, Samsun, Türkiye*

Abstract: Additive manufacturing offers advantages such as reduced waste and cost-effectiveness, and its use is increasing in industries such as aerospace and automotive. One of the additive manufacturing methods, fused deposition modelling (FDM), has a wide range of applications. This study investigated the effects of printing parameters on the strength of L-joints made using FDM. Polylactic acid (PLA), a biodegradable and recyclable material, was used to produce L-joints. The study analyses the effects of three printing parameters: nozzle temperature, filling ratio, and printing pattern. Taguchi method was used to optimise these parameters, and then ANOVA (analysis of variance) was performed to determine their contributions to the joint strength. Optimum values were obtained at 210°C nozzle temperature, 70% filling rate and zigzag pattern. The results show that the printing pattern and filling ratio significantly affect the strength of the joint, while nozzle temperature has less effect. The zigzag printing pattern and higher filling rate (70%) provided the strongest joints, reaching a maximum force of 358.4 N during tensile tests. The study concluded that optimising 3D printing parameters is very important to increase the strength and quality of printed joints.

Keywords: Additive manufacturing, Fused deposition modelling, Polylactic acid, Printing parameters, L-joint strength, Taguchi method

***Corresponding author:** Ondokuz Mayıs University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engieering, 55139, Samsun, Türkiye
E mail: gorkem.dengiz@omu.edu.tr (C. G. DENGİZ)

Aleyna TAŞKIN https://orcid.org/0000-0002-8308-9957
Cengiz Görkem DENGİZ https://orcid.org/0000-0003-1308-3223

Received: December 16, 2024
Accepted: January 21, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Taşkın A, Dengiz CG. 2025. Optimising 3D print parameters for l-joint strength using taguchi method. BSJ Eng Sci, 8(3): 591-597.

1. Introduction

The application of additive manufacturing (AM) in producing parts with complex geometries is expanding rapidly. This advanced production technique fabricates components by depositing material layer by layer, offering significant advantages over traditional manufacturing methods (Cai et al., 2024). These advantages include lower production costs, reduced material waste, elimination of secondary processes, and accelerated production times. Moreover, AM is particularly advantageous for prototyping, small-scale production, and manufacturing specialised parts (Tharanikumar et al., 2024). Fused deposition modelling (FDM) is frequently utilised among the various AM techniques due to its ease of use and ability to produce aesthetically refined products. Recently, FDM has garnered attention for its environmental benefits, including biodegradability and recyclability (Sultana et al., 2024). This method is widely employed across aerospace, dental implants, and automotive manufacturing industries. In FDM, parts are fabricated by heating filament material and depositing it layer by layer in predefined patterns dictated by the nozzle path (Vinay et al., 2024). Commonly used materials for FDM include polylactic acid (PLA), thermoplastic polyurethane (TPU), acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polyethylene terephthalate glycol (PETG), nylon, and polyether ether ketone (PEEK) (Goh et al., 2024). PLA is highly popular among these due to its recyclability, renewability, and biocompatibility. PLA, a thermoplastic polyester derived from renewable resources like corn starch or sugarcane, is environmentally friendly and suitable for manufacturing joints, prototypes, and educational tools (Ogaili et al., 2024). Joints are structural components designed to connect at least two parts, ensuring effective load transfer, support, and stability. For example, in aerospace applications, joints are critical for assembling wing sections to the fuselage, where they must withstand complex load conditions, including torsion and vibration. L-joints, a specific type of joint, are formed by combining two or more elements at a 90-degree angle. These joints play a critical role in various structural applications, including composite structures, steel plate walls, and flange joints in wind turbines (Li et al., 2019). Due to their angular geometry, L-joints are susceptible to damage under loading conditions such as tension, compression, bending, and dynamic impacts (Rucka, 2010). Understanding the mechanical behaviour and strength of L-joints is essential for accurate damage detection, failure analysis, and improving the reliability of engineering applications (Seo and Varma, 2017). Several factors influence L-joint strength, including material properties, joint geometry, loading conditions, and production methods. In FDM-produced joints, printing parameters such as nozzle temperature, fill density, and print pattern significantly affect joint strength. The quality and

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

performance of 3D-printed parts depend heavily on optimising printing parameters. The Taguchi method, a statistical optimisation approach, is widely used to refine these parameters. By employing orthogonal array designs, the Taguchi method systematically evaluates the effects of multiple parameters on the desired output, minimizing variability and reducing the number of required experiments. This efficient methodology enhances part quality by identifying the optimal combination of printing parameters (Kim et al., 2019). Extensive research has examined the influence of printing parameters on the mechanical properties of 3D-printed parts, highlighting notable trends and conclusions. For instance, nozzle temperature and fill density variations have consistently shown a direct impact on tensile strength, with higher fill densities generally improving part durability. Studies have also underscored the significance of print patterns, where specific arrangements like cross (+45°/−45°) designs facilitate more uniform load distribution, thereby enhancing strength. Collectively, these findings emphasise the pivotal role of parameter optimisation in tailoring mechanical properties to specific application requirements. For example, Gozluklu and Coker investigated the dynamic delamination behaviour of L-shaped composite materials commonly used in civil aviation. Their study revealed that kinetic energy constitutes a significant portion of total energy during crack propagation, even under quasi-static loading. Furthermore, they observed the nucleation and propagation of secondary cracks due to variations in thickness (Gozluklu and Coker, 2012). Yavas et al. studied delamination in the curved region of bonded L-shaped plates, emphasising the critical role of pre-crack size on delamination toughness (Yavas et al., 2012). Arca reinforced L-shaped composite laminates with carbon nanotube-reinforced and thin-layered carbon fibre fabric to mitigate delamination issues in aviation and wind turbine applications. Their findings highlighted the superior performance of fabric reinforcements over carbon nanotubes in preventing delamination without increasing part weight or altering material properties (Arca, 2014). Johansson explored the effects of material properties, print density, extruder temperature, print speed, and layer height on the tensile strength of 3D-printed specimens. Using PLA, ABS, and PET materials, the study found that PLA exhibited the highest strength, while ABS showed the lowest. Strength increased with higher print density and extruder temperature but decreased with higher print speed and layer height. Moreover, enclosed designs provided better layer adhesion compared to open designs (Johansson, 2016). Similarly, Günay et al. analysed the impact of printing speed, fill density, and print angle on mechanical properties. Using the Taguchi method, they identified fill density as the most influential parameter on tensile strength, followed by print angle and speed (Günay et al., 2020). Zubrzycki et al. investigated the effects of fill density and print patterns (line, grid, and honeycomb) on tensile strength in PLA, PETG, and ABS samples. They observed that higher fill densities generally enhanced strength, with optimal strength achieved using specific patterns for each material (Zubrzycki et al., 2022). Bayraktar et al. examined the influence of melting temperature, layer thickness, and print patterns (+45°/−45°, horizontal and vertical) on PLA samples. Their findings indicated that tensile strength decreased with lower layer thickness and melting temperature, while the cross (+45°/−45°) pattern outperformed others due to more uniform load distribution and reduced stress concentration (Bayraktar et al., 2017). While numerous studies have focused on the effects of printing parameters on the tensile strength of 3D-printed parts, research on L-joints subjected to mixed loading conditions is limited. This study addresses this gap by investigating the influence of nozzle temperature, fill density, and print pattern on the strength of L-joints. The Taguchi method was employed for experimental design, and analysis of variance (ANOVA) was used to identify optimal printing parameters. The findings of this research contribute to a deeper understanding of the mechanical behaviour of L-joints, providing insights for an improved design and enhanced structural reliability.

2. Materials and Methods

2.1. Material

In the study, PLA filament was preferred in producing L-joints due to its recyclability and ease of application. Filameon brand PLA filament with a diameter of 1.75 mm was used in the production of L-joint elements with the Creality brand CR-10 S5 model 3D printer. PLA filament properties are given in Table 1. The dimensions of the produced L-joint elements are given in Figure 1.

Table 1. PLA filament properties

Nozzle Temperature (°C)	Diameter (mm)	Density (g/cm^3)	Tensile Strength (MPa)	Extension Strain (%)
190-230	1.75	1.24	53	6

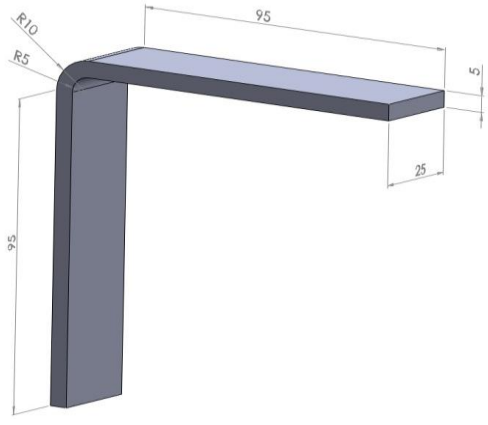


Figure 1. L-joint sample dimensions.

2.2. Methods

The study produced L-joint samples using the Creality

brand CR-10 S5 model 3D printer and the G code Ultimaker Cura program. The table temperature is set to 60°C, the recommended table temperature for PLA material. To prevent the sample from separating from the table surface during printing, masking tape was placed on the table, and the printing speed was applied as 50 mm/s. G code was created by selecting the nozzle temperature, filling ratio, and print pattern, which were determined using Taguchi's experimental design. Then, the generated G code was transferred to the printer and the L-joint samples shown in Figure 2 were produced.

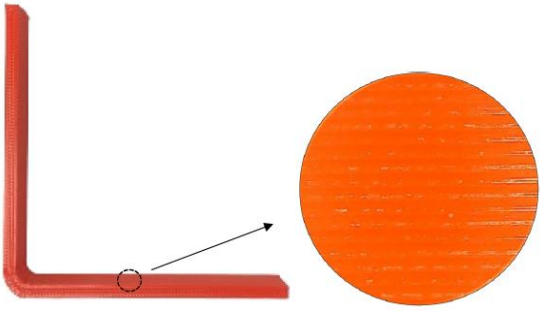


Figure 2. The l-joint sample produced with a 3D printer.

To determine the strength of the produced samples, tensile tests were performed using an INSTRON brand universal testing machine with a load capacity of 100 kN. However, due to its geometry, the L-joint element was unsuitable for the tensile device. Therefore, the necessary measurements were taken from the device, and the eared jaw, bottom plate, and pin, as shown in Figure 3, were designed.

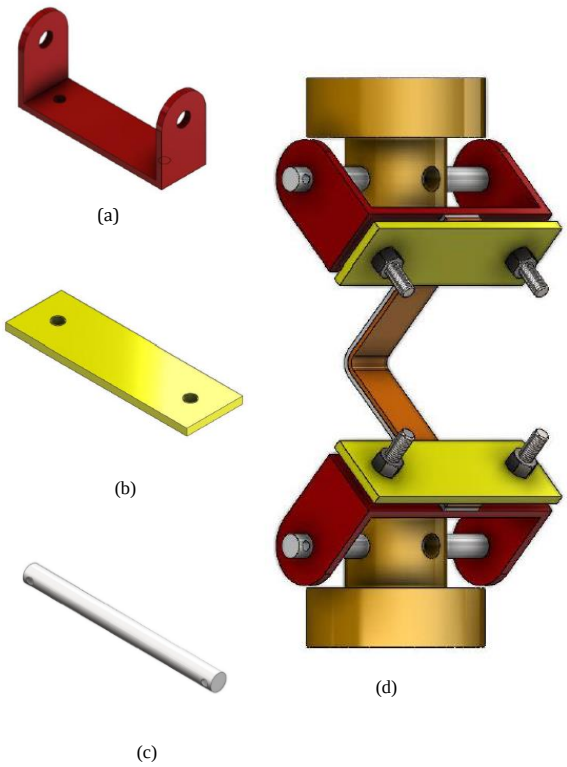


Figure 3. The jaw (a), bottom plate (b), pin (c) and assembly drawing (d).

After the design was completed, the 5 mm thick sheet metal was cut with a laser and the bending process was carried out on the press brake machine. Then, these produced parts were connected to the tensile testing device. Tensile L-joint tests were carried out at a tensile speed of 1.3 mm/min (Figure 4).

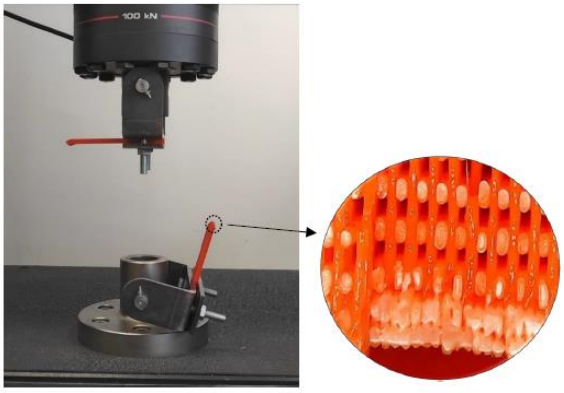


Figure 4. The tensile test applied to L-joint element.

Afterwards, the maximum forces at which the samples broke were determined with the data obtained from the tensile test. According to these maximum forces, Taguchi analysis was performed, and the optimum printing parameters were determined. ANOVA analysis detected the contribution (effect) rates of the parameters on the maximum force. In addition, regression analysis was performed to obtain the maximum force equality.

2.3. Experimental Design

This study used the Taguchi experimental design method to determine the optimum printing parameters in sample production with a 3D printer. Taguchi's experimental design is used to optimise production processes and improve product quality. It also saves time and cost by minimizing the number of experiments. The Taguchi method examines the relationship between multiple variables with the minimum number of experiments (Setyo Pradana and Sulistiyowati, 2022). Thus, optimum variables will be obtained to ensure quality production. This enables the Taguchi method to be used in many production areas, especially engineering (Mitra, 2011). Nozzle temperature, filling ratio and printing pattern were selected in this study as variable design factors (Table 2). Nozzle temperature was 190, 200 and 210°C, filling ratio was 50, 60 and 70%. The printing pattern was determined as grid, line and zigzag (Figure 5). Taguchi analysis was performed to determine the optimum values of these factors.

Table 2. Variable design factors

Factors	Lower	Middle	Upper
Nozzle Temperature (°C)	190	200	210
Filling Ratio (%)	50	60	70
Print Pattern	Grid	Line	Zigzag

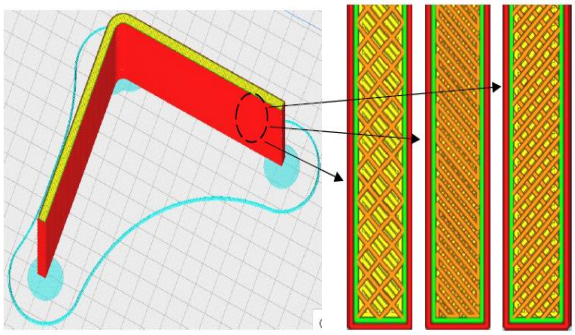


Figure 5. Grid (a), zigzag (b) and line (c) pattern.

Table 3. L9 orthogonal array

Experiment No	Factors			Output Parameters
	Nozzle Temperature (°C)	Filling Ratio (%)	Print Pattern	Max. Force (N)
1	190	50	Zigzag	261.225
2	190	60	Line	262.072
3	190	70	Grid	263.748
4	200	50	Grid	173.522
5	200	60	Zigzag	251.270
6	200	70	Line	301.397
7	210	50	Line	228.603
8	210	60	Grid	231.620
9	210	70	Zigzag	358.363

The maximum forces of L-joint samples during the tensile test were selected as the output parameter. The effect of variable design factors (nozzle temperature, filling ratio and printing pattern) on the maximum force was investigated. 9 experimental designs were obtained by selecting the 3-factor 3-level L9 (3^3) orthogonal array in the Minitab software. According to this experimental design, L-joint samples were produced with a 3D printer and tensile tests were performed. The maximum force values obtained from the tests were entered into the Minitab software as the output parameter (Table 3) In the Taguchi method, signal-to-noise (S/N) ratios are used to reduce the variability of the process and analyse the performance of the system. While the signal (S) represents successful and desired results, noise (N) represents unwanted variability, such as differences and errors. The S/N ratio optimises the process by determining signal and noise differences. The higher this ratio is, the more accurate and high-quality the process is. The S/N ratio is divided into three groups "largest is best", "smallest is best", and "nominal is best", according to the desired output parameter (Negrete, 2020). Since the highest value of the maximum force (output parameter) is desired in this study, the "largest is best" S/N ratio in equation 1 was preferred. In the equation, Y represents the quality variable, and n represents the number of experiments (Hikmat et al., 2021).

$$S/N = -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{Y_i^2}\right] \quad (1)$$

After Taguchi analysis, ANOVA was applied to determine the effect (contribution) ratio of nozzle temperature, filling ratio and printing parameter on the maximum force. ANOVA determines the statistical differences in the means between two or more groups. Thus, it presents the effect of design factors on the output parameter by determining whether these differences are significant or insignificant (Driscoll et al., 2024). After ANOVA, regression analysis was performed to determine the relationship between design differences and output parameters. As a result of regression analysis obtained the equation gives the output parameter (maximum force) value without performing experimental application.

3. Results and Discussion

The mean effect graph of S/N ratios representing the effect of printing parameters on maximum force is given in Figure 6. Upon reviewing the figure, it can be observed that as the nozzle temperature increases, the maximum force initially decreases and then increases. This rise in nozzle temperature improves the adhesion quality between the layers, making the material more durable (Johansson, 2016; Bayraktar et al., 2017). It was also found that the maximum force increases as the fill ratio rises. This suggests that a higher fill ratio has a positive impact on the maximum force (Johansson, 2016; Günay et al., 2020; Zubrzycki et al., 2022). As the fill ratio increases, the amount of material in the part increases, closing the gaps and enhancing the material's resistance to applied loads. When examining the effect of printing patterns on the maximum force, it was determined that the highest maximum force occurred in zigzag, followed by line and then grid patterns, in descending order. This indicates that the printing pattern significantly affects the strength of the part. The appropriate printing pattern should be selected based on the part's load conditions. In this study, L-joint elements were subjected to mixed load, and the zigzag pattern provided the best resistance. From the figure, the optimal values for achieving maximum force were 210°C for nozzle temperature, 70% for infill ratio, and the zigzag printing pattern.

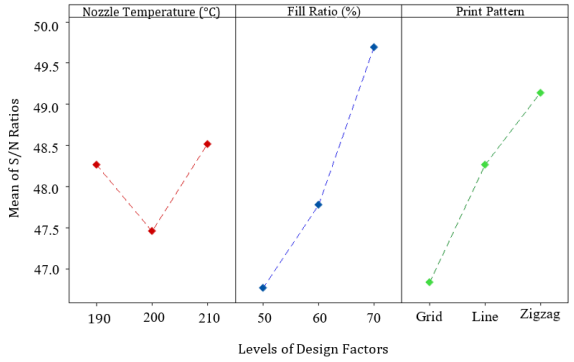


Figure 6. The mean of S/N ratios for maximum force.

Figure 7 shows the force-displacement values of 9 experimental samples determined by the Taguchi method. When the figure is examined, the lowest maximum force (173.5 N) was determined in the 4th experiment. The 4th experimental sample was produced at 200°C nozzle temperature, 50% filling ratio and grid printing pattern. The 200°C nozzle temperature negatively affected the adhesion of the filaments to each other. At low temperatures, the filaments adhered weakly to each other and increased the formation of gaps within the part. This situation also reduced the resistance of the part against the tensile force. The 50% filling ratio created the part with less material and caused more gaps. The grid pattern could not distribute the load on the part homogeneously. Therefore, the lowest force was determined in the 4th experimental sample. The highest maximum force (358.4 N) was obtained in the 9th experiment produced at 210°C nozzle temperature, 70% filling ratio and zigzag printing pattern. With the increase in temperature, the adhesion of the filaments improved, and a stronger bond was formed between the layers. When the filling ratio is 70%, the part consists of more material. Thus, the formation of gaps inside the part is reduced. This increases the resistance of the material against tensile force. The zigzag pattern prevents stress concentrations by distributing the load on the part more homogeneously than other patterns and increases durability.

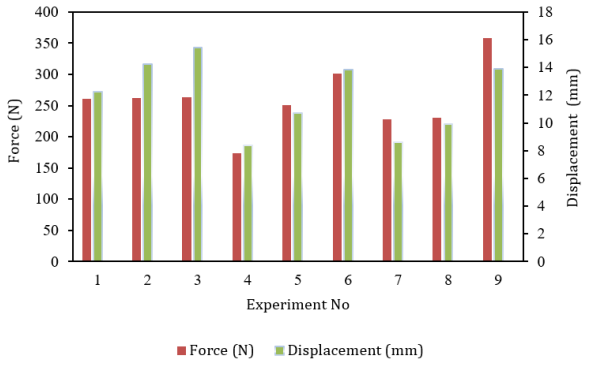


Figure 7. Force-displacement values of L-joint samples.

Figure 8 shows the force-elongation graph of the 4th and 9th test samples. When the graph is examined, it is observed that the 9th sample exhibits approximately two times more elongation compared to the 4th sample. In the 9th sample, the high nozzle temperature, high filling ratio and appropriate printing pattern delayed the rupture by allowing the material to carry more force in the plastic region. Therefore, the strength of the 9th sample was obtained higher. In the 4th sample, the material ruptures rapidly after exceeding the elastic limit. The plastic deformation zone is shorter compared to the 9th sample. The sample reaches the maximum force earlier and ruptures. This shows that the part's resistance against the applied force is lower.

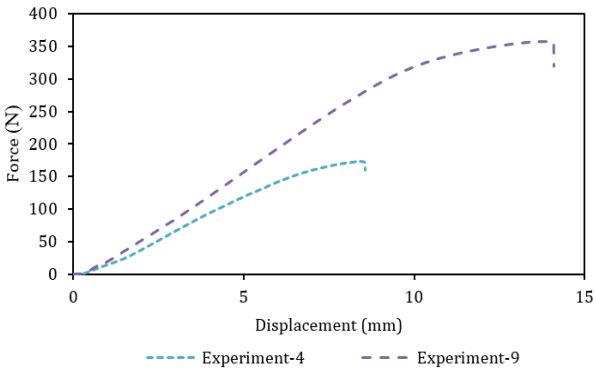


Figure 8. Force-displacement graph of 4th and 9th samples.

The ANOVA results, which were conducted to determine the contribution rates of the printing parameters on the maximum force, are given in Table 4. According to the table, the most effective parameter of the maximum force is the filling ratio, with a rate of 57.95%. This value indicates that the filling ratio significantly affects the part's strength. The most effective parameter after the filling ratio is the printing pattern, with a rate of 32.88%. The least effective parameter is the nozzle temperature, with a rate of 6.87%. In addition, when the P value in ANOVA is greater than 0.05, the effect of that factor on the output parameter is considered insignificant (Rajabi et al., 2015). When the table is examined, it is seen that the P value of the nozzle temperature and the printing pattern is greater than 0.05. Therefore, the effect of these factors on the maximum force is meaningless. In other words, the differences in these factors do not create a statistically significant difference for the maximum force. However, the P value of the filling ratio (0.038) is less than 0.05. Thus, it was determined that this factor significantly affects the maximum force for L-joints. The R2 value, which shows the model's reliability, is 97.70%. The larger this value is, the higher the reliability of the analysis. Thus, it can be stated that this analysis is highly accurate.

Table 4. ANOVA results for maximum force

Factor	Contribution Rate (%)	P-Value
Nozzle Temperature (°C)	6.87	0.251
Fill Ratio (%)	57.95	0.038
Print Pattern	32.88	0.065

After ANOVA, regression analysis was performed, which gives the relationship between maximum force and printing parameters as an equation. The relationship between nozzle temperature filling ratio and maximum force depending on the printing pattern is specified by equation 2. With this equation, the maximum force of the L-joint element can be estimated without experimentation.

$$\begin{aligned}&\text{(Grid) Max. Force} = -176 + \\ &0.692\ \text{Nozzle Temp.} + 4.336\ \text{Fill Ratio}\\ &\text{(Line) Max. Force} = -138 + \\ &0.692\ \text{Nozzle Temp.} + 4.336\ \text{Fill Ratio}\\ &\text{(Zigzag) Max. Force} = -108 + \\ &0.692\ \text{Nozzle Temp.} + 4.336\ \text{Fill Ratio}\end{aligned} \quad (2)$$

Figure 9 shows the relationship between the maximum force estimated by the regression equation and the maximum force obtained in the experiments. This relationship is represented by equation 3. In the second-degree regression model, the R^2 value was determined as 84.43%. This value shows that the equation giving the relationship between the printing parameters and the maximum force effectively estimates the maximum force.

$$\begin{aligned}&\text{Max. Force} \\ &= 204.3 - 0.3234\ (\text{Predicted Force}) \\ &+ 0.002113(\text{Predicted Force})^2\end{aligned} \quad (3)$$

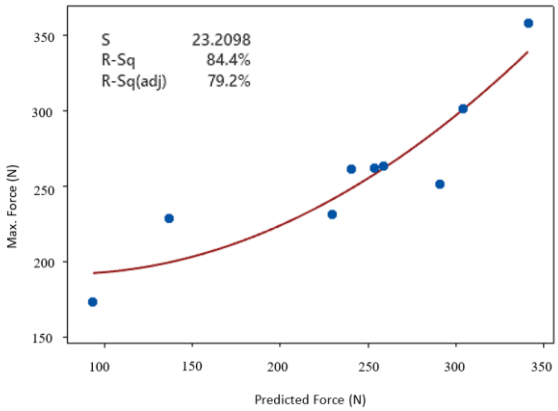


Figure 9. Second-degree regression model.

4. Conclusions

In this study, the effects of nozzle temperature (190, 200 and 210°C), filling ratio (50, 60 and 70%) and printing pattern (line, grid and zigzag) on the strength of L-joints were investigated. Optimum printing parameter values were determined using the Taguchi method. In addition, the contribution (effect) rate of printing parameters on the part strength was determined with ANOVA. The results obtained are listed below.

- A tensile test was applied to examine the strength of the samples produced at different printing parameters. As a result of the tensile test, the highest maximum force (358.4 N) was determined at 210°C nozzle temperature, 70% filling ratio and zigzag pattern.
- The lowest maximum force (173.5 N) was determined at 200°C nozzle temperature, 50% filling ratio and grid printing pattern.
- Due to the increase in nozzle temperature and filling ratio, parts with minimum gaps were produced with more material. This increased the strength of L-type samples.
- The zigzag printing pattern positively affected the strength by providing a more homogeneous load distribution on the part compared to other patterns.
- As a result of Taguchi analysis, optimum values for nozzle temperature, filling ratio and printing pattern were determined as 210°C, 70% filling ratio and zigzag pattern.
- In ANOVA, it was determined that the most effective parameter on the maximum force was the filling ratio, with a rate of 57.95%. The second most effective parameter was the print pattern, with a rate of 32.88%, and the least effective parameter was the nozzle temperature, with a rate of 6.87%.

As a result, it was determined that the printing parameters affected the strength of the L-joint samples. It

was also emphasised that the quality and performance of the produced part could be improved by optimising these parameters.

Author Contributions

The percentages of the authors' contributions are presented below. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

	A.T.	C.G.D.
C	50	50
D	50	50
S	50	50
DCP	50	50
DAI	50	50
L	50	50
W	50	50
CR	50	50
SR	50	50
PM	50	50
FA	50	50

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans.

Acknowledgement

The authors acknowledge the support of Ondokuz Mayıs University Scientific Research Projects Coordination Department through grant number BAP09-2024-5193.

References

Arca MA. 2014. Strengthening of L-shaped composite laminates using carbon nanotube reinforcement and thin ply non-crimp fabrics. MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, pp: 25.

Bayraktar Ö, Uzun G, Çakiroğlu R, Guldas A. 2017. Experimental study on the 3D-printed plastic parts and predicting the mechanical properties using artificial neural networks. Polym Adv Technol, 28: 1044-1051.

Cai R, Luo X, Xie G, Wang K, Peng Y, Rao Y. 2024. Effects of the printing parameters on geometric accuracy and mechanical properties of digital light processing printed polymer. J Mater Sci, 59: 14807-14819.

Driscoll CO, Owodunni O, Asghar U. 2024. Optimization of 3D printer settings for recycled PET filament using analysis of variance (ANOVA). Heliyon, 10: e26777.

Goh GL, Lee S, Cheng SH, Goh DJS, Laya P, Han BS, Yeong WY. 2024. Enhancing interlaminar adhesion in multi-material 3D printing: A study of conductive PLA and TPU interfaces through fused filament fabrication. Mater Sci Addit Manuf, 3: 2672.

Gözlüklü B, Coker D. 2012. Modeling of the dynamic delamination of L-shaped unidirectional laminated composites. Compos Struct, 94: 1430-1442.

Günay M, Gündüz S, Yılmaz H, Yaşar N, Kaçar R. 2020. PLA Esaslı Numunelerde Çekme Dayanımı İçin 3D Baskı İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu. Politek Derg, 23: 73-79.

Hikmat M, Rostam S, Ahmed YM. 2021. Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology. Results Eng, 11: 100264.

Johansson F. 2016. Optimizing Fused Filament Fabrication 3D printing for durability: Tensile properties and layer bonding.

Kim NP, Cho D, Zielewski M. 2019. Optimization of 3D printing parameters of Screw Type Extrusion (STE) for ceramics using the Taguchi method. Ceram Int, 45: 2351-2360.

Li H, Tu S, Liu Y, Lu X, Zhu X. 2019. Mechanical properties of L-joint with composite sandwich structure. Compos Struct, 217: 165-174.

Mitra A. 2011. The Taguchi method. Interdiscip Rev Comput Stat, 3: 472-480.

Negrete CC. 2020. Optimization of FDM parameters for improving part quality, productivity, and sustainability of the process using Taguchi methodology and desirability approach. Prog Addit Manuf, 5: 59-65.

Ogaili AA F, Basem A, Kadhim MS, Al-Sharify ZT, Jaber AA, Njim EK, Al-Haddad LA, Hamzah MN, Al-Ameen ES. 2024. The effect of chopped carbon fibers on the mechanical properties and fracture toughness of 3D-printed PLA parts: An experimental and simulation study. J Compos Sci, 8: 273.

Rajabi A, Kadkhodayan M, Manoochehri M, Farjadfar R. 2015. Deep-drawing of thermoplastic metal-composite structures: Experimental investigations, statistical analyses, and finite element modeling. J Mater Process Tech, 215: 159-170.

Rucka M. 2010. Experimental and numerical study on damage detection in an L-joint using guided wave propagation. J Sound Vib, 329: 1760-1779.

Seo J, Varma AH. 2017. Behavior and design of steel-plate composite wall-to-wall corner or L-joints. Nucl Eng Des, 323: 317-328.

Setyo Pradana E, Sulistiyowati W. 2022. Literature Review: Use of the Taguchi Method for Quality Improvement. PROZIMA Product Optim Manuf Syst Eng, 6: 85-96.

Sultana J, Rahman MM, Wang Y, Ahmed A, Xiaohu C. 2024. Influences of 3D printing parameters on the mechanical properties of wood PLA filament: an experimental analysis by Taguchi method. Prog Addit Manuf, 9: 1239-1251.

Tharanikumar L, Mohan B, Anbuchezhiyan G. 2024. Synthesization and characterization of silicon carbide and boron nitride-reinforced Al-Zn-Mg alloy hybrid nanocomposites using squeeze casting method. Int J Met, 18: 997-1011.

Vinay D, Keshavamurthy R, Erannagari S, Gajakosh A, Dwivedi YD, Bandhu D, Tamam N, Saxena KK. 2024. Parametric analysis of processing variables for enhanced adhesion in metal-polymer composites fabricated by fused deposition modeling. J Adhes Sci Technol, 38: 331-354.

Yavas D, Uyar I, Gozluklu B, Coker D. 2012. Experimental and Computational Investigation of Debonding at the Interface of Two L-Shaped Polycarbonate Plates. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, New York, USA, pp: 149-154.

Zubrzycki J, Quirino E, Staniszewski M, Marchewka M. 2022. Influence of 3D printing parameters by fdm method on the mechanical properties of manufactured parts. Adv Sci Technol Res J, 16: 52-63.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1605851

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Research Article
CVolume 8 - Issue 3: 598-604 / May 2025

BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) ON HYDRAULIC ENERGY

Zeyneb KILIÇ[1]

[1]*Adıyaman University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 02000, Adıyaman, Türkiye*

Abstract: Hydroelectric energy has various potential applications for future energy production and it is among the most efficient method to produce energy. In this study, literature data were analyzed with bibliometric methods. Bibliometric analysis is an efficient analysis method used to understand scientific communication, trends, impacts and interactions between research fields. The data used for the analysis were accessed from the WoS database. The article examined research articles published on hydraulic energy and CFD (computational fluid dynamics). As a result of the search conducted between 2000-2024 with the terms hydraulic energy and computational fluid dynamics, 214 documents were obtained. In this study, hydraulic energy was examined with bibliometric analysis and measures to be taken on the subject, comments, suggestions and research were summarized. The results can help and guide future research on the integration of hydraulic energy and related areas.

Keywords: Bibliometric analysis, Fluid dynamic, Hydro-power, Water

Corresponding author: Adıyaman University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 02000, Adıyaman, Türkiye
E mail: zkilic@adiyaman.edu.tr (Z. KILIÇ)
Zeynep KILIÇ https://orcid.org/0000-0003-4954-6955

Received: December 23, 2024
Accepted: January 24, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Kılıç Z. 2025. Bibliometric analysis of computational fluid dynamics (CDF) on hydraulic energy. BSJ Eng Sci, 8(3): 598-604.

1. Introduction

Hydropower refers to the generation of electrical power through the extraction of energy from the moving water streams (Askari et al., 2015). Water, the primary source of life, energy, all living things; to maintain the food supply and natural environment. Therefore, the rational, conscious and sustainable use of water, the protection of existing water resources, and water management issues are also important, especially for life and energy demand (Kılıç, 2020). Meeting the growing demands all over the world for electricity creates difficult decisions for many countries. Hydropower is providing us with large amounts of energy in the long term (Divyansh et al., 2022). Hydroelectric power plants have an efficiency of about 90%, which is not available from any renewable energy generation source Hydro-energy is a sustainable, renewable and clean energy type among other alternative energy sources and is also ecosystem friendly. Hydraulic energy is one of the most suitable and efficient energy sources (Divyansh et al., 2022). Media development has accelerated with the globalization process, has brought the world of science closer together. Today, the presence of countries in the international arena is directly proportional to the transformation of the useful scientific knowledge they produce into technology. New generation of media, based on the internet are one of the prominent examples of technology which make people closer to each other and more accessible than in the past (Yazdanpanah, 2021). Bibliometric analysis studies not only enable us to see the developments in a scientific field within a certain period of time, but also provide detailed information about the study and where the scientific field in question will evolve in the future. Use of bibliometric techniques to map and study the knowledge published in different fields has been growing for years. Several areas of research have already been explored in the management field using these methods (Danvila-del-Valle et al., 2019). The use of bibliometric analysis is growing rapidly; these methods allow researchers to base their findings on aggregated bibliographic data produced by other scientists working in the field who express their opinions through collaboration, citation, and writing (Župič and Čater, 2023). Bibliometric studies help with assessments and support for water management systems. Bibliometric analysis is a branch of science that deals with the examination of disciplines and study subjects as reflected in their literature production (Hood and Wilson, 2001). The bibliometric analysis is an analytical method used to obtain any concept and facilitates the monitoring, history, follow-up and interpretation of academic trends through visualization software (Dirik et al., 2023). Bibliometrics is a set of methods used to quantitatively analyze information such as author, field, subject,

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

citation, institution and country of scientific research using book chapters, articles, patents, notifications, citations and research data in published journals and books with mathematical and statistical tools. Bibliometrics provides information about the subject studied, institutions, countries, authors and collaboration between authors (Ukşul, 2016). WoS and Scopus are the most important databases for bibliometric research, and both databases are transparent in showing references (Leydesdorff et al., 2016). In addition, Google Scholar, PubMed, and Medline databases are widely used for bibliometric research (Chen, 2017). Bibliometric analysis studies evaluate the number of studies attributed to countries, institutions, and authors; the number of citations, the impact of the published study on scientific communities, the number of co-citations, and the number of studies conducted (Zupic and Cater, 2015). Bibliometric analysis methods and research support traditional review methods. Seeing the areas of deficiency in the research subject to be studied and creating a basis for new research are among the most important contributions of bibliometric research to the literature (Kozan, 2020). The analyses in this paper, are based on the SCI-Expanded database from Web of Science Core Collection, which contain the entire literatures of all fields "hydraulic energy" and "computational fluid dynamics" from 2000 to 2024. Literature review was conducted like; Wos categories-water resources or civil engineering; article document type with SCI-expanded index. As a result; 214 documents were taken into consideration in this research. The objective of this research was to assess research activity on hydraulic energy and related areas by bibliometric analysis. Bibliometric analysis methods are widely used today to quickly find and analyze a large number of scientific data.

Bibliometric studies allow us to reveal the evolutionary nuances of the subject to be researched, while shedding light on and guiding new areas in the subject under study. The research application of such studies in some areas is new and in cases not sufficiently developed. Therefore, this article will contribute to the fields conducting studies using bibliometric analysis and is a useful resource to gain insight into current techniques and procedures.

2. Materials and Methods

Bibliometric analysis is a popular, efficient, and rigorous method for gathering, examining, interpreting, and analyzing large amounts of scientific data. Bibliometric analysis is a method that can be used to analyze published data; it is a research area that examines distribution of information among publication using statistical and mathematical techniques (Danvila-del-Valle et al., 2019). In these techniques impacts of indicators, citation and co-citation analysis and mapping are performed. Bibliometric analysis allows obtaining information many of published journals and citations and keyword analysis (Culnan, 1987). The bibliometric methodology encapsulates the application of quantitative techniques on bibliometric data (Broadus, 1987). A common way to collect data for bibliometric analysis is to analyze databases containing bibliographic data. This section includes information about the purpose, importance, data source, method, findings and evaluations regarding the analysis of bibliometric methods used for the research. Methodology if this research is seen in Figure 1.

2.1. Data Source

There are many databases that can be used in bibliographic research, the most important of which are Scopus, WoS, Medline, PubMed, Google Scholar. WoS is constantly used in bibliometric studies because it covers a large number of journals and provides ease of analysis. In addition, a large portion of journals with high impact factors are scanned in WoS. In this study, (SCI-E) within the (WoS) was used as a citation database.

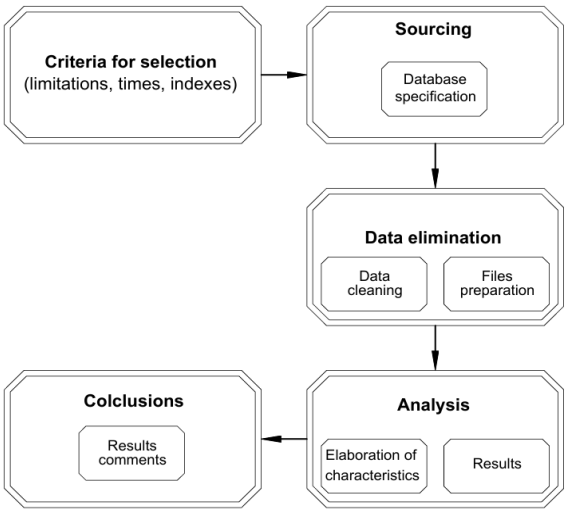


Figure 1. Methodology.

2.2. Bibliometrics and Scientific Mapping Method

Bibliometrics examines publication patterns using quantitative analysis and statistics. Bibliometrics is decisive in determining the studies published on any subject, the citations made, and how these affect subsequent research. Knowing the quantitative characteristics of publications helps in comparisons, while citation analysis helps understand the impact of the study in question on others (McBurney and Novak, 2022). VOSviewer is a probability-based data standardization approach to provide multiple visualizations in terms of co-authors, associations, and keywords, including Network, Overlay, and Density Visualization. It is well known that VOSviewer is the most widely used bibliometric tools (He et al., 2022).

2.3. Data Analysis

The search returned 214 documents from from Web of Science database on 2000-2024. Than, titles, keywords and abstracts were analyzed to ensure that there are no

duplicate and only documents related to the objectives and scope of this paper were chosen. As a result, 214 were selected for bibliometric analysis. Finally, these documents were exported in order to be analyzed via the SciMAT and VOSviewer software tools. During data analysis, the web of science core collection analysis tool and VOSviewer software were used. Preliminary analysis of authors, universities, dates, countries, citations and journals characterizing scientific production on "hydropower" and "CFD; computational fluid dynamics" were performed with the wos analysis tool. VOSviewer software was used to create the density graph. VOSviewer software helps visualize the data obtained in bibliometric analysis studies and explain the concepts in the texts. In the light of the above, water management and water resources issues were explained in this study and analyzed through bibliometric methods. The samples and data of this study are derived from the Web of Science Core Collection, the most widely and largest used database of bibliometric analysis. During this research, we adopt (SCI-E) database; which contain only WOS civil engineering cetegories and article document type. Publications were obtained through co-authorships, years, countries, co-occurrences, keywords, journals and authors. The paper has explored research articles published on water reources, climate change, drought and water resources management. All keywords (2000-2024), both those reported by authors and those attributed by ISI as well as the words in titles and abstracts. All data obtained have been converted into tables and graphs and are shown in the relevant sections of this study. As only one database (Wos-core collection) was used, the chances for repetition were minimal.

2.3.1. Publication years

According to the findings; the subject of "hydraulic energy" as generally been studied, intensively after 2015. In Table 1, publication output has increased from 1 articles in 2000 to 31 articles in 2023 and 20 papers in 2024. This clearly shows how "hydraulic energy" has received increasing attention from the scientific community since 2000. Table 1 shows the distribution of publication years of documents "hydraulic energy" and "CFD" from 2000 to 2024, which is helpful to examine the progression of literature published. It could be easily observed a steady upward trend according to Table 1, except for a few specific years (2003, 2004, 2005, 2010).

Table 1. "Hydraulic energy" and "CFD" papers output according to 2000-2024

Years	Publication Number
2024	20
2023	31
2022	23
2021	18
2020	28
2019	10
2018	22
2017	15
2016	12
2015	7
2014	5
2013	7
2012	4
2011	1
2009	9
2008	3
2007	1
2006	1
2002	2
2001	1
2000	1

2.3.2. Countries

Bibliometric coupling - countries were scanned as; minimum number of a documents of a country 3, minimum number of a citations of a country 2; and 45 countries 23 meet the thresholds. Table 2 shows the top 18 countries which produced the most documents "hydraulic energy" and "CFD". In other words, these 18 countries have done more research on the issue (hydraulic energy" and "CFD") than other countries. As the first country, the China is the most productive country with 86 documents and 865 citations. The second and third countries, USA and Spain, have 25 and 14 documents, respectively, which are lower than the China but higher than the other countries. The following productive countries are; Italy, Canada, Germany, Portugal, Türkiye, Switzerland, Iran, Austria, Norway, England, India, Belgium, Sweden, Australia, Netherlands. China, which has the most productive research institutes, is currently the best scientific research basis on the issue of the "hydraulic energy". Cooperations among the top 18 countries issue is seen in Figure 2. The number of citations shows difference between countries. The most citations (865) were observed in China documents; this is followed by Usa and Spain. When we look at Table 2, Türkiye is in the eighth place. Türkiye is not among the top 5 countries, the number of publications is 9 and citations are 109.

Table 2. Number of publications by countries (Top 18)

Countries	Documents	Citations
China	86	865
Usa	25	462
Spain	14	308
Italy	14	432
Canada	11	198
Germany	10	212
Portugal	9	300
Türkiye	9	109
Switzerland	7	28
Iran	7	100
Austria	6	40
Norway	6	114
England	6	86
India	6	16
Belgium	4	64
Sweden	4	40
Australia	4	33
Netherlands	4	86

As seen in Figure 2, China, the USA, Spain and Italy have extensive networks with strong connections on the subject. China continued its work actively until 2021. The countries that have done the most work on the subject in recent years are India and Switzerland. Studies in Türkiye increased after 2019. In Figure 2, the thickness of the lines indicates strong connections between countries. As seen in Figure 2, there are strong connections between China-Canada, China-USA, USA-Spain- Germany, Spain-Germany.

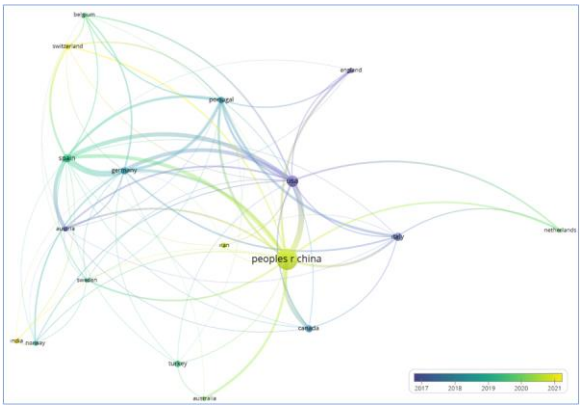


Figure 2. Cooperations among the top 18 countries.

2.3.3. Co-occurrence - author keywords

When we choose minimum number of occurrence of a keyword 4; totally 790 keywords seems, 21 meet the threshold. In order to have more visibility of the keywords related to the subject, it is recommended that authors scan only as CFD keyword (Figure 3, Table 3).

Table 3. Analysis result including CFD

Keywords	Occurrence	Selected Keywords	Occurrence
CFD	52	Hydraulic jump	6
Computational fluid dynamics (CFD)	31	Energy loss	6
Computational fluid dynamics	17	Openfoam	5
energy dissipation	12	Turbulence	5
Flow-3d	10	Flow characteristics	5
Numerical simulation	10	Hydraulic structures	5

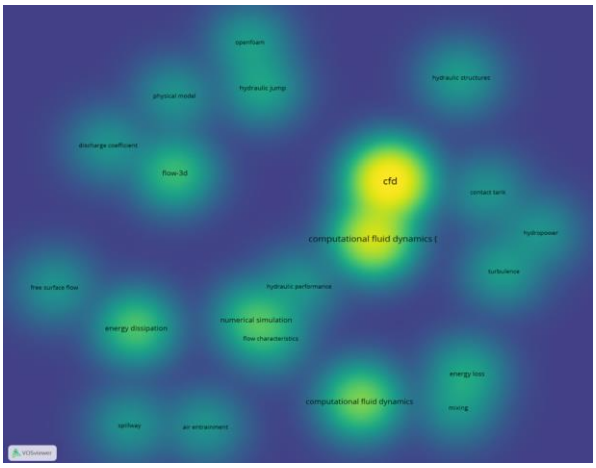


Figure 3. Analysis result including CFD.

While flow 3D software appears to be at the forefront in this field, there is also a lot of emphasis on the term energy dissipation (Table 4).

Table 4. Analysis result not including CFD

Keywords	Occurrence	Selected Keywords	Occurrence
Computational fluid dynamics	17	Energy loss	6
Energy dissipation	12	Openfoam	5
Flow-3d	10	Turbulence	5
Numerical simulation	10	Flow characteristics	5
Hydraulic jump	6	Hydraulic structures	5

2.3.4. Analysis of co-citation, cited-references

Studies that were commonly referenced in at least 10 studies are shown in Table 5. Among 6803 documents, at least 10 studies cited all 5 of the 5 studies in Table 5. In another words, 5 of these 5 studies were cited in at least 10 studies (Table 5). A co-author-related density graph was created by analyzing scientific publications obtained from WoS using VOSviewer software. According to this graph in Figure 4, the yellow colored parts are interpreted as places where author-related density is high. As seen in Table 5, the author named Hırt cw, has the most cited articles. Density Map of most cited articles are seen in Figure 4.

Table 5. List of highly cited references, in at least 10 studies

Co-author	Citations
Hırt cw, 1981	45
Çelik ıb, 2008	22
Yakhot v, 1994	17
Menter fr, 1994	18
Launder b.e., 1974	11

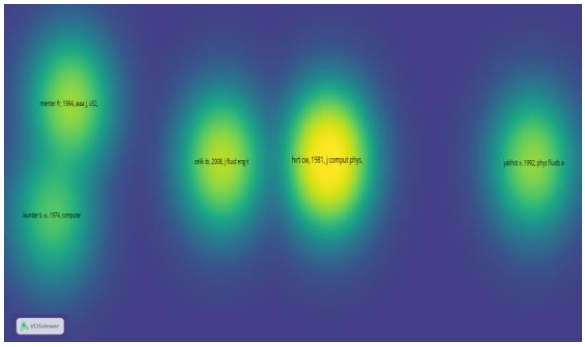


Figure 4. Density Map of most cited articles.

2.3.5. Co-authorship and authors

In analyzes minimum number of documents of an author and citations was selected as two. Of the 839 authors, 72 were evaluated under these conditions. The green group has the densest working network on the subject, and the one in the center has more connections. The size of the balls indicates the number of documents (Figure 5).

2.3.6. Publications in the top productive journals

In analyzes minimum number of documents of an author and citations was selected as 2 of the 51 sources, 25 have at least 3 citations. Data were collected from academic journals in this field from the Web of Science database. According to the analysis of those journals, the publications in the top 9 productive journals shown in Figure 5. The number of citations in journals has also increased due to the increase number of studies (Table 6). As seen in Figure 6, studies are concentrated especially in water and journal of hydraulic engineering journal.

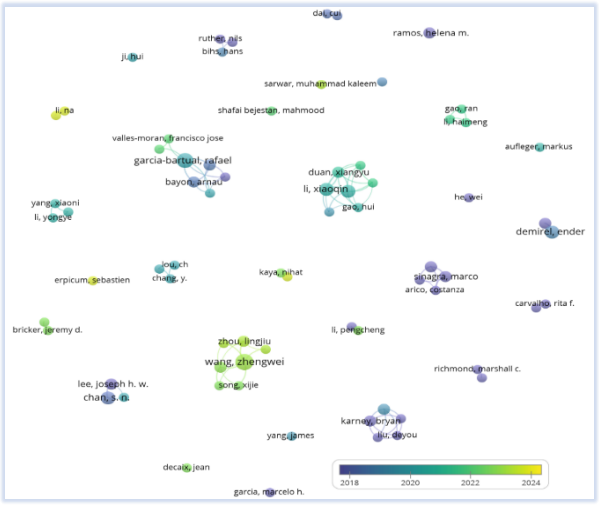


Figure 5. Co-authorship and authors analyzes.

Table 6. List of highly cited references, in at least 10 studies

Journals	Documents	Citations
Water	41	194
J. of Hydraulic Engineering	24	374
Ocean Engineering	21	311
Desalination and Water Treatment	13	132
J. of Hydraulic Research	12	124
J. Irrigation and Dran Eng	11	91
J. of Hydroinformatics	8	54
Water Research	6	163
Desalination	6	8

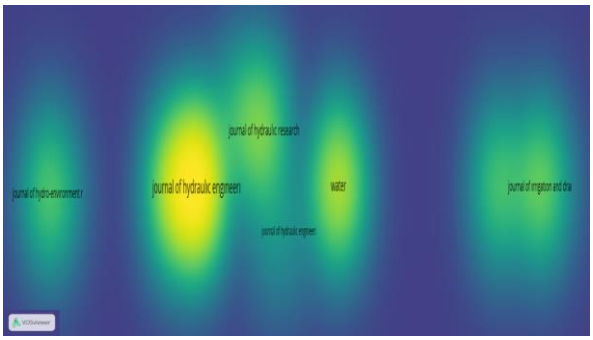


Figure 6. The publications in the top 9 productive journals.

3. Results and Discussion

Almost all energy sources arise from the physical and chemical effects of solar radiation on matter. Hydraulic energy is a continuously renewing energy source. Energy production is achieved by converting the potential energy of water into kinetic energy. Among various energy sources, hydroelectric power plants should be

preferred due to their environmental friendliness and low potential risk. Such power plants can respond to sudden changes in demand. Green energy (hydroelectric, wind, solar and biomass) should be constantly considered in energy policies. Due to its economic, scientific and social benefits, hydropower will drive the development of renewable energy and thus promote urban sustainable development. Therefore, the implementation of a sustainable hydropower development strategy is important for the coordinated development of society, economy and environment. In another study on the subject; Based on 434 publications obtained from the SCI-Expanded database, hydropower sustainability researches from 1991 to 2012 were examined with bibliometric analysis and contributed to the relevant field (Han et al., 2014). Türkiye's precipitation regime is quite irregular and unbalanced in terms of time and place. It has the characteristic of showing significant changes every year depending on meteorological conditions. In this case, it is inevitable that hydroelectric production will also show differences according to years. Türkiye is very rich in terms of macro and micro-hydroelectric potential, and if these resources are utilized, it will be possible to meet the energy needs of many places locally. Bibliometric analysis is a type of research focused on a specific field and helps us understand and better interpret global research trends on the subject, mostly by utilizing the Scopus or WoS database. Bibliometrics can reliably link publications, citations, authors, journals, identify research streams, and produce maps of published research. Interpreting the findings in bibliometric studies depends on the researcher and their specialized field knowledge, which is the difficult part. Bibliometric analysis is an effective and useful method of summarizing and synthesizing literature, without limitations. In this analyzes research, framework of the importance of the subject of hydraulic energy and CFD topics were analyzed. According to the results, water accounting was generally studied after 2015 and mostly in research papers. While China has published the most on this subject, the SCI-Expanded Index was determined as the index with the most relevant publications. There are journals, authors, dates, key-words and countries involved in this analysis research. However, a clear diversity has been observed among developed and developing countries of the world. Quantitative evaluation of the desired studies with bibliometric methods allows for the comparison of developments in the fields of expertise within the framework of world standards or between national institutions. As a result of these comparisons, deficiencies should be eliminated with collaborative studies reflecting theoretical and practical experiences at the highest level, or scientific studies should be supported in order to share expertise on the relevant subject through collaborative studies. Although the literature has covered hydropower, few of them have systematically collected data and conducted a large-scale review of scientific articles. Jiang et al. used a modeling-based bibliometric analysis method to evaluate the global scientific literature on hydropower from 1994 to 2013. They analyzed 1726 academic articles on the subject to explore the research development, current trends, and intellectual structure of hydropower literature and contribute to the field (Jiang et al., 2016). Similarly in this study 214 paper related hydraulic energy were evaluated; it is believed that this study will also contribute to related fields. This article has shown that bibliometric analysis is a scientific method that can be useful for scholars who wish to pursue retrospectives of broad and rich areas of their research. A better understanding, interpretation and detailed examination of science through bibliometric analysis can facilitate the collection of information not only in research on the subject but also in other areas. With this study, we are taking a short but important step in this direction. Some suggestions about the subject; bibliometric analyses can provide a more detailed and informative perspective on research productivity and the impact of the topic of studies; researchers should aim to find a common ground and strike a balance between presenting data and providing meaningful discussions to make their bibliometric analyses more informative, easy to understand and actionable.

4. Conclusion

In conclusion, the study examines the subject of hydraulic energy, and attempts are made to statistically examine the extent to which this subject finds a place in the literature through academic publications. According to the results obtained; the subject of hydraulic energy has generally been studied in the most article types, intensively after 2015. While China is the country with the most publications, the SCI Expanded index has been determined as the index with the most publications. The USA and China are generally places with high co-author connections. Accordingly, it can be said that there are not enough academic studies related to the subject in the national literature. This paper established that the bibliometric methodology has gained immense popularity in recent times. It is important to conduct more comprehensive research and studies on the subject with different analyses in order to contribute to the relevant literature and subsequent studies. For future research on the subject in this study, a detailed review of the bibliometric analysis research literature can be conducted at certain time intervals. In addition, bibliometric studies are extremely important for obtaining the "big picture" of subject areas. Today, science is multidisciplinary and when it is in this way, efficient results are obtained. Through bibliometric analysis, different branches of science are better understood, connections in interdisciplinary branches of science are easily revealed and comprehensive interpretations are made. With this study, we have taken a short but important step in this direction.

Author Contributions

The percentages of the author' contributions are presented below. The author reviewed and approved the final version of the manuscript.

	Z.K.
C	100
D	100
S	100
DCP	100
DAI	100
L	100
W	100
CR	100
SR	100
PM	100
FA	100

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans.

References

Askari MB, Mirzaei V, Mirhabibi M, Dehghani P. 2015. Hydroelectric energy advantages and disadvantages. Am J Energy Sci, 2(2): 17-20.

Broadus R. 1987. Toward a definition of "bibliometrics". Scientometrics, 12(5-6): 373-379.

Chen C. 2017. Science mapping: a systematic review of the literature. J Data Inf Sci, 2(2): 1-40.

Culnan MJ. 1987. Mapping the intellectual structure of MIS, 1980-1985: a co-citation analysis. MIS Q, 1987: 341-353.

Danvila-del-Valle I, Estévez-Mendoza C, Lara FJ. 2019. Human resources training: a bibliometric analysis. J Bus Res, 101: 627-636.

Dirik D, Eryılmaz I, Erhan T. 2023. Post-Truth kavramı üzerine yapılan çalışmaların VOSviewer ile bibliyometrik analizi. Sos Mucit Acad Rev, 4(2): 164-188.

Divyansh S, Amit KK, Neeraj G, Chetan S, Vikrant SP, Veerandra P, Rajeev G. 2022. Hydropower an efficient renewable source of energy: an analysis. Int J Recent Adv Multidiscip Top, 3(3): 79-81.

Han M, Sui X, Huang Z, Wu X, Xia X, Hayat T, Alsaedi A. 2014. Bibliometric indicators for sustainable hydropower development. Ecol Indic, 4:231-238.

He T, Wang D, Wu Z, Huang C, Xu X, Yang C. 2022. Bibliometric analysis of research on (R)-Ketamine from 2002 to 2021. New Approaches, 218: 109207.

Hood WW, Wilson CS. 2001. The literature of bibliometrics, scientometrics and informetrics. Scientometrics, 52: 291-314.

Jiang H, Qiang M, Lin P. 2016. A topic modeling based bibliometric exploration of hydropower research. Renew Sustain Energy Rev, 57: 226-237.

Kozan HİÖ. 2020. Okul psikolojik danışmanlığı ile ilgili yapılmış çalışmaların bibliyometrik analizi: 1980-2019. Okul Psikol Danış Derg, 3(1): 1-28.

Kılıç Z. 2020. The importance of water and conscious use of water. Int J Hydrol, 4: 239-241.

Leydesdorff L, Wouters P, Bornmann L. 2016. Professional and citizen bibliometrics: complementarities ambivalences in the development and use of indicators - a state-art report. Scientometrics, 109: 2129-2150.

McBurney MK, Novak PL. 2022. What is bibliometrics and why should you care? IEEE International Professional Communication Conference, 6–20 May, Seoul, South Korea, pp: 132.

Ukşul Ş. 2016. Türkiye'de eğitimde ölçme ve değerlendirme alanında yapılmış bilimsel yayınların sosyal ağ analizi ile değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Akdeniz Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Antalya, Türkiye, ss: 24.

Yazdanpanah J. 2021. Media and globalisation. Wittenborg Univ Appl Sci, 2021: 1-8.

Zupic I, Čater T. 2015. Bibliometric methods in management and organization. Organ Res Methods, 18(3): 429-472.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1603394

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)
Cilt 8 - Sayı 3: 605-615 / Mayıs 2025
(Volume 8 - Issue 3: 605-615 / May 2025)

KÖMÜRÜN UZAKTAN ALGILAMA (UA) YÖNTEMLERİ VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ (CBS) ARAÇLARINDA KULLANIMININ BİBLİYOMETRİK ANALİZE DAYALI İNCELENMESİ

Cevdet Bertan GÜLLÜDAĞ[1]*

[1]*Akdeniz University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Geographichal Information Systems, 07058, Antalya, Türkiye*

Özet: Kömür madenciliği, sanayileşmiş toplumlar için kritik bir enerji kaynağı olarak kalmaya devam etmektedir. Bununla birlikte, kömür madenciliğinin çevresel ve ekolojik etkileri, sürdürülebilir ve çevre dostu madencilik uygulamalarının geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Uzaktan algılama (Remote Sensing - RS) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (Geographic Information Systems - GIS), kömür yataklarının keşfi, izlenmesi ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi için güçlü araçlar olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma 2000-2023 yılları arasında kömürde CBS ve UA ilgili yapılan uluslararası akademik araştırmaların bibliyometrik analiz ile irdelenerek, gelecek beklentilerin saptanması amacıyla yapılmıştır. Çalışmada objektif ve kapsamlı sonuçların elde edilebilmesi adına WoS veri tabanından çekilen veriler kullanılmıştır. Yapılan araştırmalar doküman türü, ülke, ortak yazar, atıf, anahtar kelimeler, dergi, WoS kategorisi, sürdürülebilir kalkınma hedefleri gibi çok yönlü olarak incelenmiştir. Kömürün sürdürülebilir ve çevresel yaklaşımlarla CBS ve UA'nın kullanımına yönelik tespitler yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kömür, Linyit, CBS, Uzaktan algılama, Bibliyometrik analiz

Investigation of the Use of Coal in Remote Sensing (RS) Methods and Geographical Information Systems (GIS) Tools Based on Bibliometric Analysis

Abstract: Coal mining remains a critical energy source for industrialised societies. However, the environmental and ecological impacts of coal mining have highlighted the need to develop sustainable and environmentally friendly mining practices. Remote Sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS) are emerging as powerful tools for coal exploration, monitoring and environmental impact assessment. This study was conducted to examine the academic researches on GIS and RS in coal between 2000-2023 with bibliometric analysis and to determine future expectations. In order to obtain objective and comprehensive results in the study, data from the WoS database were used. The studies were analysed in multiple aspects such as document type, country, co-author, citation, keywords, journal, WoS category, sustainable development goals. Determinations have been made for the use of GIS and RS in sustainable and environmental approaches to coal.

Keywords: Coal, Lignite, GIS, Remote sensing, Bibliometric analysis

***Sorumlu yazar (Corresponding author):** Akdeniz University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Geographichal Information Systems, 07058, Antalya, Türkiye
E mail: bgulludag@akdeniz.edu.tr (C.B. GÜLLÜDAĞ)
C.Bertan GÜLLÜDAĞ https://orcid.org/0000-0001-5777-1808

Gönderi: 18 Aralık 2024 **Received:** December 18, 2024
Kabul: 24 Ocak 2025 **Accepted:** January 24, 2025
Yayınlanma: 15 Mayıs 2025 **Published:** May 15, 2025

Cite as: Güllüdağ CB, 2025 Investigation of the use of coal in remote sensing (RS) methods and geographical information systems (GIS) tools based on bibliometric analysis. BSJ Eng Sci, 8(3): 605-615.

1. Giriş

CBS; mekânsal verinin toplanması, depolanması, yönetimi, analiz edilmesi ve görselleştirilmesi için kullanılan bilgisayar tabanlı sistemlerdir. Bu sistemler ile farklı kaynaklardan gelen verilerin entegrasyonuyla haritalar ve raporlar oluşturulabilir (Longley vd., 2015). CBS ile karmaşık mekansal verilerin ilişkileri saptanabilir ve karar destek mekanizmaları kurulabilir. CBS; şehir planlama, doğal kaynak yönetimi, çevre izleme ve ulaşım gibi birçok alanda uygulanmaktadır (Goodchild, 1992). UA; tarım, orman yönetimi, su kaynaklarının yönetilmesi, afet izleme, çevresel izleme gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Lillesand vd., 2015). Uydu görüntülerinin işlenmesi ve analiz edilmesi ile ilgili gelişmiş algoritmalar, yeryüzü tespiti ve izlenmesinde güçlü araçlar sunar (Jensen, 2007).

Kömür, bileşiminde organik ve inorganik maddeleri barındıran sedimanter bir kayaçtır. Gelişen CBS araçları ve yöntemleri, kömür ile ilgili çok sayıda araştırmada kullanılmıştır. Kömür yataklarının tespiti, değerlendirilmesi ve haritalandırılması süreçlerindeki jeolojik veriler ve uydu görüntüleri CBS ile birleştirilebilir (Goodchild, 1992). CBS ile kömür rezervlerinin daha doğru ve verimli belirlenmesi sağlanabilir (Harris, 1989). CBS'nin kömür

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

madenciliğinde kullanımı verimliliği arttırırken aynı zamana çevresel sosyal sorumluluğun da yerine getirilmesine katkıda bulunur (Longley vd., 2015). Madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi ve su kaynaklarının korunması gibi alanlarda CBS uygulamaları yaygın olarak kullanılmaktadır (Miller ve Nussbaum, 2016). CBS ve UA teknolojilerinin entegrasyonu, kömür madenciliği alanında çevresel sürdürülebilirliği artırmak ve operasyonel verimliliği optimize etmek için geniş bir potansiyele sahiptir (Liu vd., 2014).

UA ile kömür yataklarının jeolojik, morfolojik ve çevresel etkileri analiz edilebilir (Li vd., 2013). Termal görüntüleme teknikleriyle kömür yangınları tespit edilebilir (Zhang vd., 2018). UA teknolojileri, uydu ve hava araçları aracılığıyla toplanan verilerin analiz edilmesiyle, yüzey ve alt yüzey kömür yataklarının tespiti ve haritalanması için kullanılmaktadır. Bu teknoloji, özellikle geniş alanların hızlı ve maliyet etkin bir şekilde incelenmesi açısından büyük avantajlar sunar (Zhang vd., 2018). Multispektral ve hiperspektral görüntüleme teknikleri, farklı kömür türlerinin ve mineral bileşimlerinin belirlenmesine olanak tanır (Kalinowski ve Oliver, 2004).

Kömür madenciliği ile ciddi çevresel sorunlar ortaya çıkabilir. Açık işletme maden ocaklarında geniş alanlarda toprak ve bitki örtüsü tahrip olabilir (Ghose, 2004).

Madencilik faaliyetlerinde ortaya çıkan asidik su, yeraltı ve yüzey sularının kirlenmesine neden olabilir (Younger, 2001). Kömürün yakılması ile önemli miktarda sera gazı ve karbondioksit (CO_2) ortaya çıkar, bu da küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi önemli çevresel sorunlara neden olur (IPCC, 2014). Kömürün yanması ile ortaya çıkan kükürt dioksit (SO_2), azot dioksit (NO_2) gibi gazlar asit yağmurlarına neden olarak ormanlar, göller ve tarım arazilerini olumsuz etkileyebilir (Smith, 1987). Kömür külü çevreye olumsuz etkiler bırakabilir (Adriano vd., 1980). Kömür endüstrisinin çevresel etkilerini azaltmak için temiz kömür teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması önem arz etmektedir (Rubin vd., 2007).

Bu çalışmada, uluslararası araştırmalar ışığında kömür madenciliğinde UA ve CBS teknolojilerinin kullanımı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Her ne kadar ayrı ayrı bibliyometrik analizin CBS, UA ve kömür için farklı alanlarda yapıldığı çalışmalar olsa da, tümünün bir arada olduğu bir araştırma bulunmamaktadır. Bu çalışma, kömür madenciliğinin çevresel etkilerini minimize etmeye yönelik yenilikçi yöntemlerin araştırılmasına ve bu alandaki geleceğe yönelik yapılacak araştırmaların tespit edilmesini amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

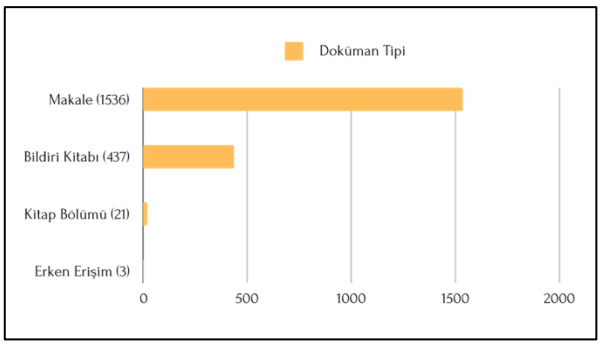
Kömür ile ilgili araştırmalarda UA ve CBS kullanımı ile ilgili yapılan uluslararası bilimsel çalışmalar incelenmiştir. Yöntem olarak kapsamlı sonuçların ele alındığı ve objektif sonuçlar veren bibliyometrik analiz kullanılmıştır. Bu analizde WoS (Web of Sciences) veri tabanı kullanılmıştır. WoS'taki arama modülünde TOPIC = (coal* OR lignite*) AND ("remote sensing*" OR GIS*) formülü yazılmıştır. Böylece kömür veya linyit kelimelerinden birinin ve UA veya CBS yöntemlerinden birinde yer aldığı başlıklardaki araştırmalara ulaşım hedeflenmiştir. Elde edilen çalışmaların başlangıcı olan 2000 yılından, 2023 yılı sonuna kadar olanlar baz alınmıştır.

Çalışmalar iki aşamalı olarak analiz edilmiştir. Yayın türü, yıl dağılımı, WoS kategorileri, ülkelere göre dağılımları, katkı sağlayan yazalar, konu ile ilgili yayın yapan öncü dergiler gibi bilgiler WoS ekranındaki analiz sonuçları kısmından çekilen verilerin işlenmesi ile elde edilmiştir. Ağ analizi yapılan kısımlar ise ücretsiz bir yazılım olan WoSviewer 1.6.20 paket programı (Van Eck ve Waltman, 2010) ile yapılmıştır. Analizlerde kullanılan öğelerde daire şekli kullanılmıştır. Daire boyutu büyücükçe öğenin ağırlığı da doğru orantılı olarak artmaktadır. Öğeleri birbirine bağlayan ağlar ve daire renkleri kümeleri temsil etmektedir. Öğelerin arasındaki mesafe ise makalenin gücünü göstermektedir (Yuan vd., 2021).

3. Bulgular

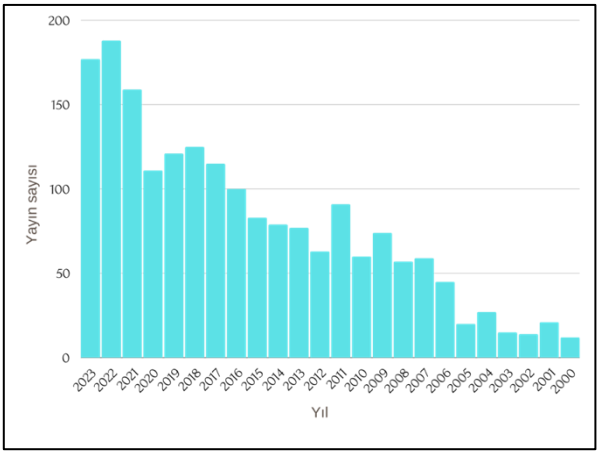
3.1. Yayınların Türü, Yılı ve Ülkelerine Göre Genel Dağılımları

İlk çalışmanın yapıldığı 2000 yılından bu yana toplam 1997 çalışma tespit edilmiştir. Bunların doküman türüne göre sınıflandırılması ile ilgili grafik Şekil 1'de yer almaktadır. Büyük çoğunluğu 1536 kayıt ile makale oluştururken, kalan kısım bildiri kitabı (%21,8), kitap bölümü (%1,05) ve erken erişim (%0,05) statüsünde yer alır. Makalelerin 42 tanesi derleme olarak tespit edilmiştir.

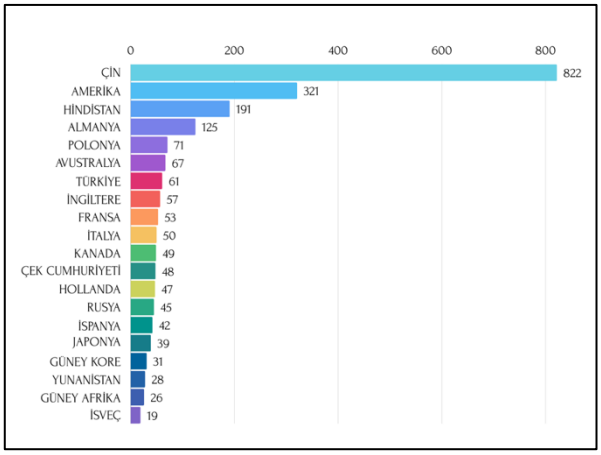


Şekil 1. Doküman türü dağılımları.

Yapılan araştırmaların yıllara göre dağılımları WoS'tan çekilen veriler ile tespit edilmiştir. Buna göre konu ile ilgili ilk çalışma 2000 yılında yapılmaya başlamıştır. 2005 yılına kadar yüksek oranda bir artış göstermeyen araştırmalar UA veya CBS'nin Fen Bilimlerinde kullanımının yaygınlaşması ile 2006 yılında artışa geçmiştir. Her ne kadar belli yıllarda azalmalar gösterse dahi 2017 yılına kadar yavaş artış ile seyreden grafik 2021 yılına kadar çok büyük bir artış gözlenmeden devam etmiştir. 2021 yılında yine bir artış trendi yakalayan araştırmalar en yüksek sayıya 2022 yılında ulaşmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Araştırmaların yıllara göre dağılım grafiği.



Şekil 3. Araştırmaların ülkelere göre dağılımı (İlk 20 ülke).

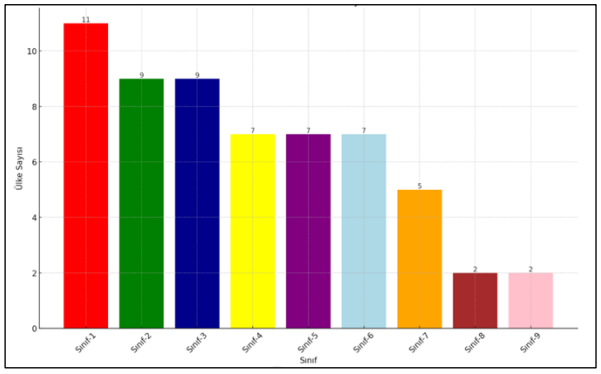
Araştırmaların ülkelere göre dağılımları incelendiğinde toplam 83 ülkede çalışmaların yürütüldüğü tespit edilmiştir. Araştırmaların yapıldığı ilk 20 ülke yaklaşık %90'lık bir kısmı oluşturmaktadır. Kalan %10'luk kısımda 63 ülke yer almaktadır ve oranları düşüktür. Bu nedenle Şekil 3'te ilk 20 ülkenin dağılım grafiği görülmektedir.

Dünya kömür rezervi jeolojik koşullara bağlı olarak değiştiğinden ülkelerin de kömür rezervleri farklılık göstermektedir. Kömür rezervinin büyük bir kısmı belli ülkelerde yoğunlaşmıştır. Bu ülkeler; Amerika Birleşik Devletleri (ABD) (249 milyar ton), Rusya (162 milyar ton), Avustralya (149 milyar ton), Çin (142 milyar ton), Hindistan (106 milyar ton) olarak sıralanabilir (IEA, 2023).

Kömür rezervinde her ne kadar dördüncü sırada olsa da Çin küresel kömür üretiminin yaklaşık yarısını gerçekleştirmektedir. 2022 yılında Çin'in kömür üretimi 4,5 milyar ton civarındaydı. Çin dışında küresel kömür üretiminde ülkeler sırasıyla Hindistan (800 milyon ton), Endonezya (600 milyon ton), ABD (500 milyon ton), Avustralya (500 milyon ton) olarak sıralanmaktadır (IEA, 2023). Bu bilgilerden kömür üretiminde olduğu gibi kömür tüketiminde Asya ülkelerinin zirvede olduğu anlaşılmaktadır.

Ülke dağılımları incelendiğinde en yüksek oranın Çin (822 kayıt) olduğu tespit edilmiştir. İkinci sırada Amerika (321 kayıt), üçüncü sırada Hindistan (191 kayıt) ve dördüncü sırada Almanya (125 kayıt) yer almaktadır. Bu dört ülke araştırmaların %58'ini oluşturur. Burada dikkat çeken ülke Almanya'dır. Almanya kömür rezervi, üretim ve tüketim açısından ilk beş ülkeden biri olmamasına rağmen araştırma yapan ülkeler sıralamasında ilk sıralarda yer almaktadır. Türkiye ise 61 kayıt sayısı ile listede yedinci sırada yer almaktadır. Bu durum Türkiye'nin de kömür ve kömür üretiminde CBS ve UA araştırmalarına önem verildiğini göstermektedir.

Ülkelerin ortak yazar bakımından ayrıldığı sınıflar Şekil 4'te yer almaktadır. İlk sınıfta Arjantin, Brezilya, Kolombiya, Fransa, İsrail, Meksika, Fas, Hollanda, Portekiz, İspanya, İsviçre olmak üzere 11 ülke yer almaktadır ve Şekil 4'te bu ülkeler kırmızı renkte gösterilmektedir. İkinci sınıfta da 9 ülke yer alır ve yeşil renk ile gösterilmektedir. En güçlü patlamayı yapan Amerika'nın ve Çin'in yanı sıra bu sınıfta Kanada, Mısır, Etiyopya, Pakistan, Suudi Arabistan, Güney Afrika, Güney Kore gibi ülkeler yer alır. Türkiye'nin de içinde bulunduğu sınıf 3 (koyu mavi renk ile temsil edilen) Bulgaristan, Çek Cumhuriyeti, Japonya, Romanya, Rusya, Sırbistan, Slovakya, Ukrayna ülkelerinden oluşur. Sınıf 4, Sınıf 5 ve Sınıf 6 eşit sayıda ülke ile temsil edilmektedir ve bu sayı 7'dir. Sınıf 4'te öne çıkan iki ülke Yunanistan, İtalya ve Belçika'dır. Sınıf 5'te ise Polonya ve Avustralya ülkeleri patlama yapmıştır. Altıncı sınıf ülkelerinde farklılık yaratan ve ciddi bir patlama yapan bir ülke bulunmamaktadır. Sınıf 7'nin en dikkat çeken ülkesi İngiltere'dir. Sınıf 8 (Almanya ve Moğolistan), Sınıf 9 (Gana ve Hindistan) olmak üzere ikişer ülkeden oluşmaktadır.



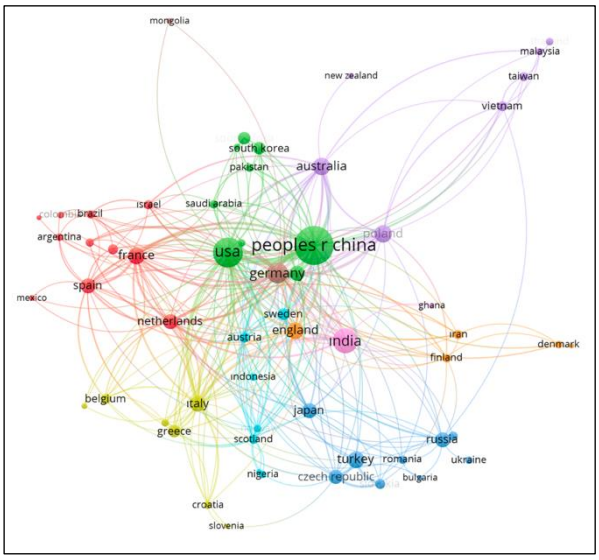
Şekil 4. Ülkeler bakımından ortak yazar ağ analizi sınıfları.

Ülkeler bakımından ortak yazar ağ analizi yapılarak birbiri ile ortak çalışan yazarların kayıtlı oldukları ülke bağlantıları hakkında yorum yapılabilmektedir. Yapılan analiz ile ülkeler 9 sınıfa ayrılmıştır ve 59 öğe, 309

bağlantı ile temsil edilmektedir (Şekil 5).

Buna göre konu ile ilgili en çok çalışmayı Çin Halk Cumhuriyetindeki araştırmacılar yapmıştır. Çinli araştırmacılar en kuvvetli bağlantıyı ikinci sırada yer alan Amerikalı yazarlar ile yapmıştır. Çinli araştırmacıların yayılımı oldukça fazla olup, bu durum Dünya'nın farklı ülkelerinden araştırmacıların Çin ile ortak çalışmaları bulunması şeklinde yorumlanabilir. Çin 32 ülkeden araştırmacı ile çalışma yürütmüştür.

İkinci sırada yer alan Amerika Birleşik Devletlerindeki araştırmacılar toplam 35 ülke ile araştırma yapmıştır. Amerika'nın yayın sayısı Çinli yazarların yaklaşık yarısı kadar olsa da bu sayı Çin'den fazladır. Bu durum Amerikalı araştırmacıların yayılımının daha kuvvetli olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 5. Ülkeler bakımından ortak yazar ağ analizi sınıfları.

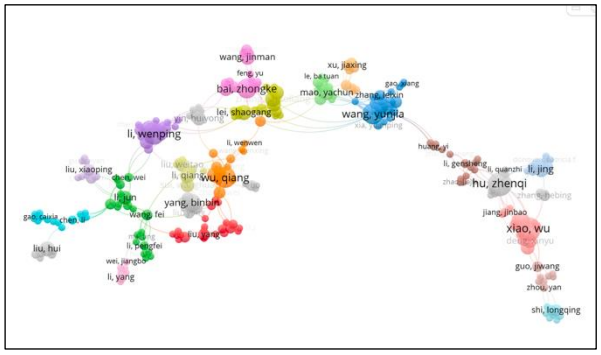
3.2. Yazarlar Bakımından Ortak Oluşum ve Ortak Atıf Ağ Analizi

Tablo 1'de kömür ve linyit araştırmalarında CBS ve UA kullanımına katkı sağlayan ilk 50 yazarın listesi yer almaktadır. Bu 50 yazarın yayın sayılarındaki yakınlık dikkat çekicidir. Bu yazarlar toplam 606 araştırmaya imza atmıştır. İlk sırada yer alan yazar Li J. (32 kayıt) kömür yangınlarının UA ile tespit edilmesi, tarım arazilerinin kömür kaynakları üzerindeki etkisi, enerji arz taleplerinin tespiti gibi konularında araştırmalar yapmıştır. En çok atıf alan araştırması termal analizlerle bilinmeyen kömür yangınlarının tespit edilmesi üzerinedir (Kuzenzer vd., 2007). Liu Y (18 kayıt) kömür madenlerinin çevresel etkileri konularında araştırmalar yapmıştır. En çok atıf alan çalışması kömür madenciliğinin kent toprakları üzerindeki çevresel ve insan sağlığı üzerindeki etkilerin tespiti üzerinedir (Qing, 2015). Hu ZQ, UA ile kömürün çevresel etkileri konularında, Xiao W, kömür madenciliğinde uzay zamansal değişimin incelenmesi gibi konularda araştırmalar yapmıştır. Bu üç yazarın ortak çalışmaları da bulunmaktadır.

Tablo 1. Katkı sağlayan yazarlar

Yazarlar	Kayıt Sayısı	Yazarlar	Kayıt Sayısı
Li J	32	Blachowski J	10
Hu ZQ	20	Bovensmann H	10
Wu Q	19	Burrows JP	10
Liu Y	18	Li DL	10
Xiao W	18	Li M	10
Li Y	17	Li XJ	10
Wang Y	16	Mao YC	10
Li WP	15	Marschalko M	10
Wang YJ	15	Yang BB	10
Bai ZK	14	Zhang Y	10
Chen L	14	Gerilowski K	9
Lee S	14	Gorai AK	9
Wang J	14	Liu H	9
Yang Z	14	Mao SJ	9
Zhang J	14	Qin QM	9
Zhao YL	14	Wang JM	9
Kuenzer C	13	Wang T	9
Chen Y	12	Yilmaz I	9
Li Q	12	Zeng YF	9
Prakash A	12	Zhang HB	9
Singh PK	12	Zhang JZ	9
Tiwari AK	12	Zhang SL	9
Kumar A	11	Choi JK	8
Wang QQ	11	Gupta RP	8
Wu LX	11	Kim KD	8

Yazarların ortak oluşum ağ analizi Şekil 6'da verilmiştir. Toplam 263 öğe, 24 sınıf, 717 bağlantıdan oluşan bu analizde büyük patlama yaparak farklılık yaratan yazarlar yerine benzer büyüklükte patlama yapan birden çok yazar ön plana çıkmıştır. Li Wenping, Wu Qiang, Wang Yunija bunlardan bazılarıdır. Farklı sınıflar içinde en çok bağlantı yaparak yayılım gösteren yazar Wang Yunija'dır. Bu durum yazarın farklı sınıflar ile ortak çalışmalar yaptığını ve tek bir yazar grubu ile araştırma yürütmediğinin göstergesidir.

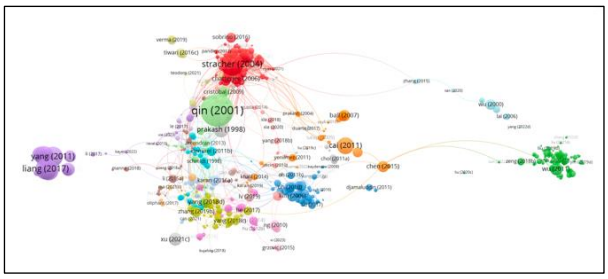


Şekil 6. Yazarların ortak oluşum ağ analizi.

Alıntılanan yazarlar bakımından ortak atıf analizi Şekil 7'de verilmiştir. Toplamda 435 yazar, 20 sınıf, 1204 bağlantı tespit edilmiştir. Analizde en çok göze çarpan yazar ve çalışması Qin'i (2001)'dir. Merkezde patlama yapan ve çok sayıda araştırmadan alıntılanan çalışma literatürde büyük öneme sahiptir. Özellikle Çin kömür yataklarında meydana gelen kömür yangınları üzerine odaklanan araştırma, yazarın da uzmanlık alanlarından olan kömür yangınlarının çevresel etkileri, kontrol yöntemleri, ekonomik kayıpları konuları üzerinedir.

İkinci büyük patlamayı Stracher ve Taylor (2004) tarafından yapılan çalışma oluşturmaktadır. Bu çalışma da Qin (2001) gibi benzer bir konu olan kömür yangınları üzerinedir. Yazar, kömür yangınlarının jeolojik etkileri, kömür yangınları sırasında ortaya çıkan mineral ve kimyasal değişimleri, çevresel kirlilikleri üzerine odaklanmıştır.

Bu iki çalışma karşılaştırıldığında Stracher'in Qin'den çok daha fazla çalışmada atıf olarak alındığını ve ağ yayılımının yüksek olduğu gözlenmektedir. Bunların dışında merkezden uzakta (sol alt kısım) büyük patlama yapmış, ancak ağ yayılımı gerçekleşmemiştir.



Şekil 7. Alıntılanan yazarlar bakımından ortak atıf ağ analizi.

3.3. Anahtar Kelimelerin Ortak Oluşum Ağ Analizi

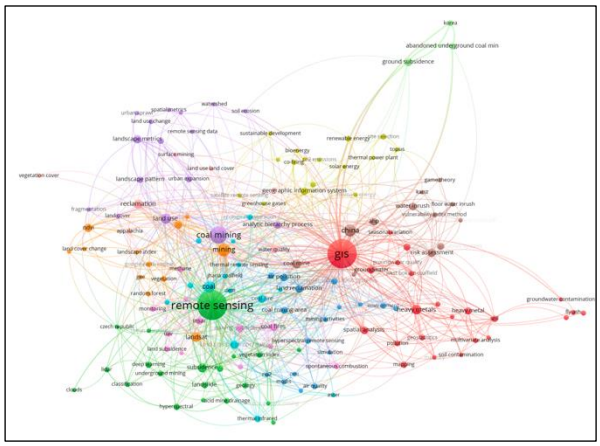
Şekil 8'de anahtar kelimelerin ağ analizi yer almaktadır. Buna göre anahtar kelimelerin birbiri ile bağlantısı tespit edilerek yorumlama yapılabilir. Grafikteki anahtar kelimeler 8 ana sınıfta incelenebilir. Bu sınıfların öncü ve patlama yapan anahtar kelimeleri; GIS (Coğrafi Bilgi Sistemleri), Coal (Kömür), Coal Mining (Kömür Madenciliği), Land Use (arazi Kullanımı), Landscape Metrics (peyzaj Metrikleri), Water Quality (Su Kalitesi) ve Heavy Metals (Ağır Metaller) olarak sıralanabilir.

Analiz toplamda 11 sınıf, 832 bağlantı ve 152 öğe (anahtar kelime) tespit edilmiştir. Merkezde patlama yapan (kırmızı renkte) GIS anahtar kelimesi en büyük patlamalardan birini yapmıştır. Bunun dışında en büyük patlamayı yapan Remote Sensing anahtar kelimesi olmasına rağmen, GIS kadar geniş bir ağ yayılımına sahip değildir.

GIS; yeraltı suyu kirliliği (groundwater contamination), risk değerlendirmesi (risk assessment), mekânsal analiz (spatial analysis), ağır metaller (heavy metals) gibi öğelerle güçlü bağlantılara sahiptir.

Remote Sensing; ağ analizinde yeşil renkte gözlenen ve merkezde patlama yapmış bir anahtar kelimedir. Coal mining (kömür madenciliği), Coal combustion (kömür yanması), Coal mine area (kömür madeni alanı) gibi anahtar kelimelerle güçlü bağlantılara sahiptir.

Mavi renkte temsil edilen kömür madenciliği (coal mining); genellikle kömürün çevresel etkilerinin izlenmesi ile ilgili araştırmalarla ortak çalışmalar yapmıştır. Bunlar, surface mining (yüzey madenciliği), mining area (madencilik alanı), water quality (su kalitesi) gibi konular olarak sıralanabilir.



Şekil 8. Anahtar kelimeler bağlamında ağ analizi

3.4. Dergilerin Ortak Oluşum ve Ortak Atıf Ağ Analizi

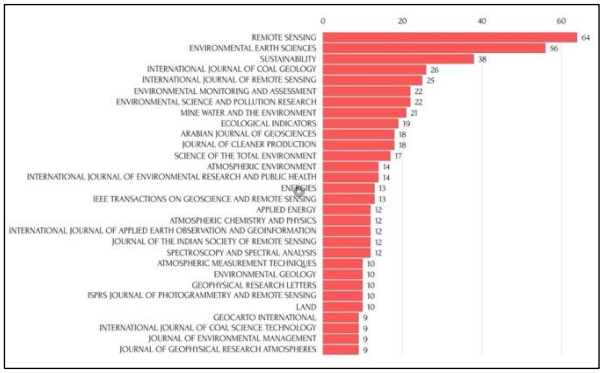
Grafikte kömür çalışmalarında GIS ve Remote Sensing ile ilgili yayın yapan dergilerin ilk 30 tanesi yer almaktadır (Şekil 9). Bu grafik belirli dergilerin ve araştırma alanlarının akademik camiada ne kadar aktif olduğunu ve hangi konuların daha fazla araştırıldığı hakkında bilgi vermektedir.

İlk 3 dergi Remote Sensing (64 kayıt), Environmental Earth Sciences (56 kayıt), Sustainability (38 kayıt) ile toplam 158 araştırma ile büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bunun dışında International Journal of Coal Geology (26 kayıt) ve International Journal of Remote Sensing (25 kayıt) dergileri de yüksek kayıt sayısına sahiptir.

Remote Sensing en çok yayın yapan dergidir. Benzer şekilde International Journal of Remote Sensing dergisi de UA ile ilgili çalışmaların yayınlandığı bir dergidir. Bu durum UA teknolojilerinin popülaritesini ve önemini ifade etmektedir.

Diğer bir konu ise çevre bilimleridir. Kömürün çevreye etkilerinin incelendiği dergilere örnek olarak Environmental Earth Sciences (22 kayıt) ve Environmental Science and Pollution Research (22 kayıt) örnek olarak verilebilir. Benzer şekilde Science of the Total Environment (14 kayıt) çevresel çalışmalar ile ilgili yayınlar yapmaktadır. Bunun yanı sıra Sustainability (38 kayıt) dergisinin üst sıralarda yer alması kömür ile ilgili sürdürülebilirlik çalışmalarında CBS ve UA kullanımının etkin rol oynadığının bir göstergesidir.

Bu dergiler kadar olmasa da orta düzey yayın sayısına sahip Atmosferic Environmental (14 yayın) fosil yakıt kaynaklı hava kirleticilerinin atmosferik olarak CBS ve UA ile incelendiğini göstermektedir. Daha düşük yayın sayısına sahip olan dergiler ise Mine Water ve Environment Ecological Indicator örnek verilebilir.



Şekil 9. Öncü dergilerin grafiksel gösterimi.

Dergilerin ortak atıf ağ analizi Şekil 10'da verilmiştir. 18 sınıf, 167 öğe ve 723 bağlantı tespit edilmiştir. Ağ analizinde Merkezde patlama yapan 3 dergi dikkat çekmektedir. Bunlar; Sustainability, Environmental Earth Sciences ve Remote Sensing'tir.

Sustainability grafiğin orta-sağ bölümünde yer almaktadır. Çok sayıda dergi ile bağlantısı olup, turuncu renkte temsil edilen kümede yer almaktadır. Bu küme, çevre bilimleri, ekolojik çalışmalar, sürdürülebilir kalkınma konularında yayınlar yapmaktadır. Sustainability dergisi; Ecological Indicator, Environmental Earth Science, Science of the Total Enviroment, Journal of the Cleaner Production gibi dergilerle yakından bağlantılıdır ve atıf iş birlikleri olduğunu göstermektedir. Sustainability; çevre izleme, yenilenebilir enerji ve ekolojik çalışmalar gibi konuları kapsayan bir yelpazeyi oluşturmaktadır.

Environmental Earth Science; Sustainability ile aynı merkezde ve kümede (turuncu renk) yer alır. Turuncu renkte kümelenmiş dergiler Mine Water and Environment, Arabian Journal of Earth Sciences, Environment Monitoring and Assessment olarak örneklendirilebilir. Environment Earth Science; Sustainability, Journal of Geochemical Exploration, Environment Monitoring and Assessment ile güçlü ağ bağlantısına sahiptir. Bu dergi yer bilimleri ve çevresel etkileri, jeolojik süreçler, çevre ve yersel izleme konularında çalışmaları içermektedir.

Bir diğer patlama yapan dergi Remote Sensing'tir. Merkezi konumda, mor renk kümesinde izlenebilecek olan dergi Environmental Earth Science ve Sustainability dergilerinden daha farklı bir alanda çalışmaları içerir. Daha çok UA ve CBS ile ilgili çalışmalara odaklanmıştır. Yeryüzü gözlemi, çevre izleme alanlarındaki uygulamalarda uzmanlaşan dergi IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation ve Sensors ile yakın bağlantılara sahiptir.

3.5. WoS Kategorilerinin Dağılımı

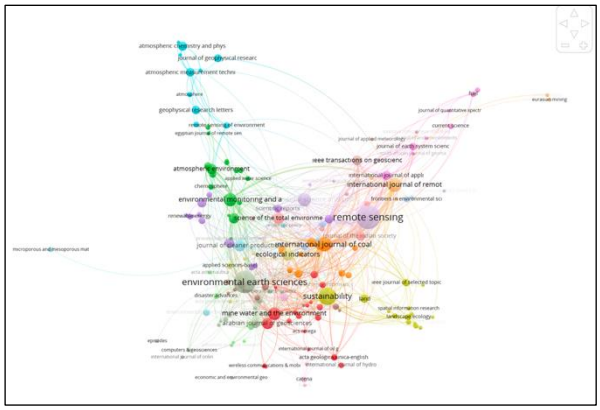
Kömür çalışmalarında CBS araçlarının ve UA teknolojilerinin kullanımının incelendiği akademik çalışmaların dahil olduğu WoS kategorileri incelenmiştir. ilk 30 tanesi Tablo 2'de yer almaktadır. WoS kategorilerinin analiz edilmesinin önemi; bir akademik çalışmanın konusunu, alanını sınıflandırabilmek ve yorumlayabilmek adına yol gösterici olmasıdır.

Elde edilen analiz sonucunda WoS kategorileri; çevre ve yer bilimleri, UA ve görüntüleme teknolojileri, enerji ve yakıtlar, meteoroloji ve atmosfer bilimleri, mühendislik ve teknoloji, bilgisayar bilimleri ve diğer bilim dalları olmak üzere 7 temel başlıkta sınıflanabilir.

Birinci grup çevre ve yer bilimleri üzerine olup; Environmental Sciences (572 kayıt), Geosciences Multidisciplinary (389 kayıt), Water Resources (164 kayıt), Environmental Studies (90 kayıt), Engineering Environmental (88 kayıt), Green Sustainable Science Technology (85 kayıt) WOS kategorilerinden oluşmaktadır. En çok çalışmanın yer aldığı WOS kategori sınıfı olan çevre ve yer bilimlerinde; su temini, su kaynaklarının yönetimi, çevresel politikalar, sürdürülebilirlik, çevresel kirlilik kontrolü, yeşil ve sürdürülebilir teknoloji gibi konular yer almaktadır.

İkinci grup UA ve görüntüleme teknolojilerinin yer aldığı, Remote Sensing (205 kayıt), Imaging Science Photographic Technology (145 kayıt) kategorilerini kapsar. UA ile doğa ve çevresel değişikliklerin takibi, farklı görüntüleme sistemlerinin tasarlanması ve kullanımı gibi konular üzerine çalışmaları içerir. Üçüncü grup, enerji ve yakıtlar sınıfı olarak tespit edilmiştir. Energy Fuels (120 kayıt) bu sınıfa dahil edilebilir. Enerji verimliliği, yakıtlar, enerji üretimi, yakıt teknolojileri konularında çalışmalar bu kategoride yer almaktadır.

Bir diğer grup meteoroloji ve atmosfer bilimleri çalışmalarının bulunduğu Meteorology Atmospheric Sciences (111 kayıt) kategorisinde hava olayları, atmosferik incelemeler, iklim değişikliği gibi konular ele alınmaktadır. Mühendislik ve Teknoloji sınıfında çevre, jeoloji, elektrik, kimya, inşaat gibi mühendislik temel alanındaki kategoriler, bilgisayar sınıfında bilgisayar bilimleri kategorileri, diğer bilim dalları sınıfında ise fiziksel coğrafya, mineral madencilik prosesleri, ekoloji, multidisipliner bilimler, fizik, kimya, ekoloji gibi WoS kategorileri yer almaktadır.



Şekil 10. Dergilerin ağ analizi.

3.6. Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri Bakımından Analiz

CBS ve UA kullanılarak kömür ve linyit araştırmalarında sürdürülebilir kalkınma hedefleri incelenmiştir (Tablo 3).

Kayıt sayılarına göre bu hedefler en yüksek düzey, orta düzey, orta-düşük düzey ve düşük düzey olmak üzere 4 kısımda incelenmiştir. En yüksek kayıt sayısına sahip hedefler; iklim eylemi (Climate Action) (687 kayıt), sürdürülebilir şehirler ve topluluklar (Sustainable Cities And Communities) (636 kayıt) olarak tespit edilmiştir ve diğer hedeflerden kayıt sayısı bakımından ayrılmıştır. Bu hedeflere hizmet eden çok sayıda araştırma yapıldığı gözlenmektedir.

Orta düzey kayıt sayısına sahip hedefler karasal yaşam (Life on Land) (462 kayıt), temiz su ve sanitasyonu (Clean Water And Sanitation) (123 kayıt) olarak sınıflandırılabilir. Doğal yaşam ve biyoçeşitliliğin korunması, su kaynaklarının korunması çalışmaları bu hedeflerde bulunmaktadır. Bir sonraki grupta daha az kayıt sayısına sahip hedefler olan sağlıklı, kaliteli yaşam, temiz enerji çözümleri yer almaktadır. En düşük kayıt sayısı ise kaliteli eğitim ve toplumsal cinsiyet eşitliği üzerine olan hedefleri içerir.

Tablo 2. WoS kategorileri tablosu (İlk 30)

WoS Kategorileri	Kayıt Sayısı	WoS Kategorileri	Kayıt Sayısı
Environmental Sciences	572	Geochemistry Geophysics	48
Geosciences Multidisciplinary	389	Geography	47
Remote Sensing	205	Multidisciplinary Sciences	46
Water Resources	164	Public Environmental Occupational Health	44
Imaging Science Photographic Technology	145	Engineering Chemical	43
Energy Fuels	120	Engineering Electrical Electronic	42
Meteorology Atmospheric Sciences	111	Physics Applied	36
Environmental Studies	90	Chemistry Physical	31
Engineering Environmental	88	Biodiversity Conservation	30
Green Sustainable Science Technology	85	Geology	29
Geography Physical	70	Chemistry Multidisciplinary	28
Mining Mineral Processing	67	Computer Science Information Systems	25
Materials Science Multidisciplinary	53	Instruments Instrumentation	20
Ecology	50	Computer Science Interdisciplinary Applications	18
Engineering Geological	50	Engineering Civil	18

Tablo 3. Sürdürülebilir kalkınma hedeflerine göre araştırma sayıları

Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri	Kayıt Sayısı
Climate Action	687
Sustainable Cities And Communities	636
Life On Land	462
Clean Water And Sanitation	123
Good Health And Well Being	82
Affordable And Clean Energy	73
Zero Hunger	69
Life Below Water	24
Responsible Consumption And Production	23
No Poverty	15
Industry Innovation And Infrastructure	8
Gender Equality	5
Decent Work And Economic Growth	4
Reduced Inequality	4
Peace And Justice Strong Institutions	4
Quality Education	2

4. Tartışma

4.1. Kömür Araştırmalarında UA ve CBS Kullanımına Genel Bakış

CBS araçları ve UA teknolojileri mekânsal verilerin toplanması, analiz edilmesi ve görselleştirilmesinde devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. Bu teknolojiler kömür yataklarının belirlenmesinden çevresel etkilerinin değerlendirilmesine kadar geniş bir yelpazede kullanım sunmaktadır. CBS ile kömür aramalarında maden sahalarının planlanması ve yönetiminde önemli avantajlar sağlamaktadır. CBS, kömür rezervlerinin haritalanması, madenlerin çevresel etkilerinin izlenmesi ve madencilik faaliyetlerinin optimize edilmesi için kullanılmaktadır. CBS kullanarak maden sahalarının topografik analizleri yapılabilir ve bu sayede en uygun madencilik yöntemleri belirlenebilir (Goodchild, 1992). Bu çalışmada yapılan ağ analizleri de bunu destekler niteliktedir. Kömür madenciliği (coal mining), CBS ve UA'dan sonra merkezde patlama yapan üçüncü önemli anahtar kelimedir (Şekil 8).

Kömür araştırmalarında UA teknolojileri, kömür yataklarının keşfi ve değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. UA, özellikle geniş alanlarda kömür rezervlerinin belirlenmesinde ve yüzey değişikliklerinin izlenmesinde etkilidir. Landsat ve Sentinel gibi uydu sistemleri, yüksek çözünürlüklü görüntüler sağlayarak kömür yataklarının haritalanmasını ve izlenmesini mümkün kılmaktadır (Chuvieco ve Huete, 2010). Şekil 8'de yeşil renk ile temsil edilen remote sensing (uzaktan algılama) anahtar kelimesi ile yapılan ortak anahtar kelimeler içinde de landsat da yer almaktadır. Bunun dışında UA ile yapılan çalışmalarda hiperspektral, lidar gibi yöntemlerin de kullanıldığı anlaşılmaktadır.

Bunların yanı sıra CBS ve UA'nın birlikte yapıldığı araştırmalar da bulunmaktadır. CBS ve UA teknolojilerinin birlikte kullanımı, kömür araştırmalarında daha kapsamlı ve detaylı analizler yapılmasına olanak tanır. Bu entegrasyon, hem yüzey hem de yer altı kömür yataklarının haritalanmasında büyük avantajlar sağlar. Örneğin, uydu görüntüleri kullanılarak kömür rezervlerinin yüzeydeki dağılımı belirlenebilir ve bu veriler CBS ortamında analiz edilerek daha detaylı bilgi elde edilebilir (Jensen, 2005).

Kömür madenciliğinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesinde CBS ve UA teknolojileri kritik rol oynamaktadır. Araştırmada incelenen çalışmalardaki hem WOS kategorisinde (Environmental Sciences) hem de sürdürülebilir kalkınma hedeflerinde (climate action) ilk sırada yer alanlar çevre ile ilgilidir. Özellikle su kirliliği, toprak erozyonu ve habitat tahribatı gibi çevresel sorunların izlenmesi ve yönetilmesinde bu teknolojiler etkin bir şekilde kullanılmaktadır. UA, maden sahalarındaki değişiklikleri izlemek ve bu değişikliklerin çevresel etkilerini değerlendirmek için kullanılırken, CBS bu verilerin analiz edilmesi ve görselleştirilmesi için kullanılır (Foody, 2002). Kömür madenciliğinin çevresel etkileri, su kirliliği, toprak erozyonu ve habitat tahribatı gibi çeşitli olumsuz sonuçlara yol açabilir. UA, bu etkilerin izlenmesi ve değerlendirilmesinde önemli bir araçtır. Özellikle zaman serisi analizleri, madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerini uzun vadede izlemeyi mümkün kılar (Weng, 2012). Kuzey Çin'deki kömür madenciliği alanlarında çevresel değişiklikleri izlemek için UA teknolojilerinden yararlanılan çalışmada MODIS ve Landsat görüntüleri kullanılarak madencilik faaliyetlerinin su kalitesi ve bitki örtüsü üzerindeki etkileri analiz edilmiştir, sonuçlar, UA'nın çevresel izleme ve değerlendirme süreçlerinde etkin bir araç olduğunu ortaya koymuştur (Liu vd., 2014).

CBS ve UA teknolojilerinin kullanımına dair birçok akademik çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Ebner vd. (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, CBS ve UA kullanılarak kömür madenlerinin çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, Zhang vd. (2013) kömür yataklarının UA ile tespiti ve haritalanması üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalar, CBS ve UA teknolojilerinin kömür araştırmalarında ne kadar etkili ve verimli olduğunu göstermektedir.

UA, kömür yataklarının keşfinde ve haritalanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle hiperspektral ve multispektral görüntüler, kömür içeren formasyonların yüzeydeki spektral özelliklerini tespit etmek için kullanılır. Bu görüntüler, kömür yataklarının yerini ve genişliğini belirlemede yüksek doğruluk sağlar (Kalinowski ve Oliver, 2004). Çin'in Shenfu-Dongsheng kömür sahasında UA teknolojilerini kullanarak kömür yataklarının haritalanmasını gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, Landsat 8 OLI ve Sentinel-2A görüntüleri kullanılarak kömür yataklarının yüzeydeki dağılımı başarılı bir şekilde belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar,

UA teknolojisinin kömür yataklarının keşfinde yüksek doğruluk ve verimlilik sunduğunu göstermektedir (Zhang vd., 2018).

Yeni nesil UA teknolojileri, kömür araştırmalarında daha hassas ve detaylı analizler yapılmasına olanak tanımaktadır. İncelenen çalışmalarda da lidar, derin öğrenme, insansız hava aracı, insar gibi UA ile ilgili anahtar kelimeler yer almaktadır (Şekil 8). LiDAR ve SAR (Sentetik Açıklıklı Radar) gibi teknolojiler, yüzey altı yapıların ve maden sahalarının detaylı haritalanmasında kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek çözünürlük ve doğruluk sunmaktadır (Miller ve Nussbaum, 2016). ABD'nin Wyoming eyaletindeki bir kömür madeni sahasında LiDAR ve SAR teknolojilerini kullanarak detaylı topoğrafik ve jeolojik analizler yapmışlardır. Bu çalışma, yeni nesil UA teknolojilerinin kömür madenciliğinde nasıl kullanılabileceğini ve sağladığı avantajları göstermektedir (Miller ve Nussbaum, 2016).

4.2. UA ve CBS Çalışmalarına Göre Kömür Araştırmalarının Geleceğe Yönelik Tahminleri

Gelecekte kömür kullanımının azaltılması yönünde güçlü bir eğilim bulunmaktadır. Paris İklim Anlaşması ve diğer uluslararası anlaşmalar, karbon emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir ve bu da kömür kullanımını doğrudan etkilemektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), kömür talebinin 2030 yılına kadar düşeceğini öngörmektedir. Bu düşüş, yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımı ve enerji verimliliği tedbirlerinin yaygınlaşması ile ilişkilidir (IEA, 2021). Bu çalışmada incelenen araştırmaların sürdürülebilir kalkınma hedeflerinde küresel ısınma, sürdürülebilir şehirler ve toplumlar gibi örnekler yer almaktadır (Tablo 3).

Kömürün gelecekteki kullanımı, karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojilerinin gelişimine bağlı olacaktır. CCS teknolojileri, kömürle çalışan enerji santrallerinin karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir. Bu teknolojilerin maliyet etkin hale gelmesi, kömürün sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak kalabilmesi için kritiktir (Gibbins ve Chalmers, 2008).

Kömürün gelecekteki kullanımı, sadece enerji üretimi ile sınırlı kalmayabilir. Kömür, kimyasal maddelerin üretiminde hammadde olarak kullanılabilir. Kömürden metanol, sentetik doğal gaz ve diğer kimyasalların üretimi, kömürün enerji dışındaki kullanımlarını artırabilir (Xu vd., 2009).

Kömür kullanımının geleceği, bölgesel ve küresel eğilimlere göre değişkenlik gösterebilir. Örneğin, Asya ülkelerinde (özellikle Çin ve Hindistan) kömür talebinin bir süre daha yüksek kalması beklenmektedir. Ancak, bu ülkelerde de yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş süreci hızlanmaktadır.

Kömür madenciliği ve kömürle çalışan enerji santrallerinin çevresel ve sağlık üzerindeki olumsuz etkileri, kömür kullanımını azaltma yönündeki baskıları artırmaktadır. Hava kirliliği, su kaynaklarının kirlenmesi ve ekosistemlerin bozulması gibi sorunlar, kömür araştırmalarının odak noktalarını değiştirmektedir (Epstein vd., 2011).

Tüm bu durumlar gelecekte kömür ile ilgili araştırmaların bir süre daha özellikle Asya ülkelerinde rezerv olarak arayışın süreceğini ancak küresel çapta çevresel etkileri ve insan sağlığı üzerindeki etkilerin araştırılmasına devam edileceği yönünde bir eğilime işaret etmektedir. Yeni uydu teknolojilerinin geliştirilmesiyle daha hassas, yüksek çözünürlükte mekânsal izleme, zamansal değişim, çevre ve insan sağlığı üzerine araştırmaların yapılacağı, sürdürülebilirlik, iklim değişikliği konularının daha çok vurgulanacağı şeklinde yorumlanabilir. Fosil yakıt kaynaklı yakıtların kullanımının kısıtlanmasına yönelik alınacak yasal tedbirlerin akademik araştırmalara da yansıyacağı bir gerçektir.

5. Sonuç

Kömür veya linyit araştırmalarında CBS araçları ya da UA yöntemlerinin WoS veri tabanından alınan veriler ile bibliyometrik analizi yapılmıştır. Araştırmaların %77'si makale doküman türünde olup, kalan kısım bildiri, kitap bölümü, erken erişim doküman türleri oluşturmaktadır. Yapılan akademik çalışmalar 2000 yılından başlamış, artan grafikle günümüze kadar devam etmiştir. Ülkelere göre yapılan çalışmalar incelendiğinde toplam 83 ülkede çalışmaların yürütüldüğü tespit edilmiştir. Araştırmaların yapıldığı ilk 20 ülke yaklaşık %90'lık bir kısmı oluşturmaktadır. Çin başta olmak üzere, Amerika, Hindistan, Almanya gibi ülkelerde çok sayıda araştırma yapıldığı gözlenmiştir. Ülkeler bakımından ortak atıf ağ analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda Çin Halk Cumhuriyetindeki araştırmacıların en büyük patlamayı yaptığı belirlenmiştir. İkinci büyük patlama ise Amerikalı araştırmacılar tarafından yapılmıştır. Amerika'nın yayın sayısı Çinli yazarların yaklaşık yarısı kadar olsa da bu sayı Çin'den fazladır. Bu durum Amerikalı araştırmacıların yayılımının daha kuvvetli olduğuna işaret etmektedir.

Araştırmalara en çok katkı sağlayan yazar Li J. (32 kayıt) kömür yangınlarının UA ile tespit edilmesi, tarım arazilerinin kömür kaynakları üzerindeki etkisi, enerji arz taleplerinin tespiti gibi konularında araştırmalar yapmıştır. Liu Y (18 kayıt) kömür madenlerinin çevresel etkileri konularında araştırmalar yapmıştır.

Yazarların ortak oluşum ağ analizine göre büyük patlama yaparak farklılık yaratan yazarlar yerine benzer büyüklükte patlama yapan birden çok yazar ön plana çıkmıştır. Li Wenping, Wu Qiang, Wang Yunija bunlardan bazılarıdır. En çok bağlantı yaparak yayılım gösteren yazar Wang Yunija'dır.

Alıntılanan yazarlar bakımından ortak atıf analizine göre en çok alıntı yapılan çalışma Qin (2001) tarafından yapılmıştır. İkinci büyük patlamayı Stracher ve Taylor (2004) tarafından yapılan çalışma oluşturmaktadır (Stracher ve Taylor 2004). Bu iki çalışma da kömür yangınları üzerinedir.

Anahtar kelimeler çalışmaların yönelimini anlayabilmek açısından önem arz etmektedir. Bu kapsamda da

çalışmada detaylı olarak anahtar kelimeler ve birbiri ile bağlantıları incelenmiştir. Grafikteki anahtar kelimeler 8 ana sınıfta incelenebilir. Bu sınıfların öncü ve patlama yapan anahtar kelimeleri; GIS (Coğrafi Bilgi Sistemleri), Coal (Kömür), Coal Mining (Kömür Madenciliği), Land Use (arazi Kullanımı), Landscape Metrics (peyzaj Metrikleri), Water Quality (Su Kalitesi) ve Heavy Metals (Ağır Metaller) olarak sıralanabilir.

Dergilerin ortak oluşum ve ortak atıf ağ analizine göre; Remote Sensing (64 kayıt), Environmental Earth Sciences (56 kayıt), Sustainability (38 kayıt) ile toplam 158 araştırma ile büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Environmental Earth Science ve Sustainability dergilerinden daha farklı bir alanda çalışmaları içerir. Daha çok UA ve CBS ile ilgili çalışmalara odaklanmıştır.

Elde edilen analiz sonucunda WoS kategorileri; çevre ve yer bilimleri, UA ve görüntüleme teknolojileri, enerji ve yakıtlar, meteoroloji ve atmosfer bilimleri, mühendislik ve teknoloji, bilgisayar bilimleri ve diğer bilim dalları olmak üzere 7 temel başlıkta sınıflanabilir. Birinci grup çevre ve yer bilimleri üzerine olup; Environmental Sciences (572 kayıt), Geosciences Multidisciplinary (389 kayıt), Water Resources (164 kayıt), Environmental Studies (90 kayıt), Engineering Environmental (88 kayıt), Green Sustainable Science Technology (85 kayıt) WoS kategorilerinden oluşmaktadır. İkinci grup UA ve görüntüleme teknolojilerinin yer aldığı, Remote Sensing (205 kayıt), Imaging Science Photographic Technology (145 kayıt) kategorilerini kapsar.

CBS ve UA kullanılarak kömür ve linyit araştırmalarında sürdürülebilir kalkınma hedefleri incelenmiştir. En yüksek kayıt sayısına sahip hedefler; iklim eylemi (Climate Action) (687 kayıt), sürdürülebilir şehirler ve topluluklar (Sustainable Cities And Communities) (636 kayıt) olarak tespit edilmiştir ve diğer hedeflerden kayıt sayısı bakımından ayrılmıştır.

CBS araçları ve UA teknolojileri mekânsal kömür analizlerinde kullanılmaktadır. CBS, kömür rezervlerinin haritalanması, madenlerin çevresel etkilerinin izlenmesi ve madencilik faaliyetlerinin optimize edilmesi için kullanılmaktadır. Günümüzde kömür araştırmalarında UA teknolojileri, kömür yataklarının keşfi ve değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. UA, özellikle geniş alanlarda kömür rezervlerinin belirlenmesinde ve yüzey değişikliklerinin izlenmesinde etkilidir. Bunların yanı sıra CBS ve UA'nın birlikte yapıldığı araştırmalar da bulunmaktadır. Kömür madenciliğinin çevresel etkileri, su kirliliği, toprak erozyonu ve habitat tahribatı gibi çeşitli olumsuz sonuçlara yol açabilir. UA, bu etkilerin izlenmesi ve değerlendirilmesinde önemli bir araçtır.

Uydu teknolojilerinin son on yıldaki gelişimi önümüzdeki yıllarda da katlanarak artacağını işaret etmektedir. Yapılan bu çalışma önümüzdeki yıllarda yeni sahaların aranmasından ziyade mekânsal izleme, zamansal değişim, çevre ve insan sağlığı üzerine araştırmaların yapılacağı, sürdürülebilirlik, iklim değişikliği konularının daha çok vurgulanacağı yorumunu yapmaya olanak sağlamaktadır.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	C.B.G.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışmanın hazırlanması ve analiz süreçlerindeki desteklerinden ötürü Dr. Selin Karadirek'e teşekkürlerimi sunarım.

Kaynaklar

Adriano DC, Weber JT, Sutter LA. 1980. Trace elements in fly ash and their environmental significance. J Environ Qual, 9(3): 333-339.

Chuvieco E, Huete A. 2010. Fundamentals of satellite remote sensing. CRC Press, Florida, USA, pp:45.

Ebner H, Fritz L, Heipke C. 2010. Integrated sensor orientation. Photogramm Rec, 25(129): 132-144.

Epstein PR, Buonocore JJ, Eckerle K, Hendryx M, Stout BM, Heinberg R, Glustrom L. 2011. Full cost accounting for the life cycle of coal. Ann NY Acad Sci, 1219(1): 73-98.

Foody GM. 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. Remote Sens Environ, 80(1): 185-201.

Ghose MK. 2004. Effect of opencast mining on soil fertility. J Sci Ind Res, 63: 1006-1009.

Gibbins J, Chalmers H. 2008. Carbon capture and storage. Energy Policy, 36(12): 4317-4322.

Goodchild MF. 1992. Geographical information science. Int J Geogr Inf Syst, 6(1): 31-45.

Harris RL. 1989. Nonrenewable resource geology and GIS. In: Tomlinson RF, Calkins HW (Eds.), Geogr Inf Syst Resour Manag, Springer, London, UK, pp: 105-116.

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris, France, pp: 78.

International Energy Agency (IEA). 2021. World Energy Outlook 2021. Paris: IEA Paris, France, pp: 60.

International Energy Agency (IEA). 2023: World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, Paris, France, pp:35.

Jensen JR. 2005. Introductory digital image processing: A remote sensing perspective. Prentice Hall, Upper Saddle River, USA, pp:25.

Jensen JR. 2007. Remote sensing of the environment: An Earth resource perspective. Prentice Hall, Upper Saddle River, Washington, USA, pp:35.

Kalinowski A, Oliver S. 2004. ASTER mineral index processing manual. Remote Sens Appl Group, Geosci, Canberra, Australia, pp:123.

Kuenzer C, Zhang J, Li J, Voigt S, Mehl H, Wagner W. 2007. Detecting unknown coal fires: synergy of automated coal fire risk area delineation and improved thermal anomaly extraction. Int J Remote Sens, 28(20): 4561-4585.

Li Z, Zhang L, Shen H. 2013. A review of remote sensing image fusion methods. Inf Fusion, 14(1): 3-15.

Lillesand TM, Kiefer RW, Chipman JW. 2015. Remote sensing and image interpretation. Wiley, New Jersey, USA, pp: 113.

Liu Y, Chen Y, Shi K. 2014. Monitoring coal mining impacts using remote sensing techniques: A case study in northern China. J Environ Manag, 133: 144-152.

Longley PA, Goodchild MF, Maguire DJ, Rhind DW. 2015. Geographic information systems and science. Wiley, New Jersey, USA, pp:251.

Miller J, Nussbaum R. 2016. Applications of LiDAR in coal mining. Min Eng, 68(3): 45-50.

Qin Z, Karnieli A, Berliner P. 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. Int J Remote Sens, 22(18): 3719-3746.

Qing X, Yutong Z, Shenggao L. 2015. Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China. Ecotoxicol Environ Saf, 120: 377-385.

Rubin ES, Yeh S, Hounshell DA, Taylor MR. 2007. Experience curves for power plant emission control technologies. Int J Energy Technol Policy, 5(1): 52-69.

Smith RA. 1987. Acid rain: The Southern Appalachian experience. Environ, 29(7): 14-20.

Stracher GB, Taylor TP. 2004. Coal fires burning out of control around the world: thermodynamic recipe for environmental catastrophe. Int J Coal Geol, 59(1-2): 7-17.

Van Eck NJ, Waltman L. 2010. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics, 84: 523-538.

Weng Q. 2012. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. Remote Sens Environ, 117: 34-49.

Xu C, Yan J, Zheng X. 2009. Overview of the direct coal liquefaction. Energy Convers Manag, 50(5): 1050-1073.

Younger P. 2001. Mine water pollution in Scotland: nature, extent and preventative strategies. Sci Total Environ, 265(1-3): 309-326.

Yuan J, Chen C, Yang W, Liu M, Xia J, Liu S. 2021. A survey of visual analytics techniques for machine learning. Comput Visual Media, 7: 3-36.

Zhang L, Wu H, Wei J, Liu X, Hu Z. 2018. Remote sensing monitoring of coal fires using multi-temporal thermal infrared data: A case study in Urumqi, China. Int J Appl Earth Obs Geoinf, 67: 196-204.

Zhang L, Wu Z, Li X. 2013. Coal seam identification using remote sensing technology. Int J Coal Geol, 105: 1-9.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1614203

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 616-626 / May 2025

DETERMINATION OF CRITICAL VARIABLES FOR RESILIENT URBANIZATION

Mahmut Esat ÇAKMAK[1], Esra DOBRUCALI[2]*

[1]*Sakarya University, Institute of Natural Sciences, Department of Civil Engineering, 54100, Sakarya, Türkiye*
[2]*Sakarya University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 54100, Sakarya, Türkiye*

Abstract: As society urbanizes in economic, political, demographic, and sociological terms, living spaces, buildings, streets, avenues, and facilities must also physically adapt to urbanization and form resilient urbanization. The 11. goal of Sustainable Development Goals is defined as "Sustainable Cities and Communities". The goal of this target is to "Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient, and sustainable". This target once again highlights the importance of sustainable and resilient cities and urbanization. This study was conducted to identify the fundamental and critical variables in resilient urbanization. In this study, a comprehensive literature review was conducted for resilient urbanization, identifying 11 key and 22 critical variables. Semi-structured questionnaire was designed for the 11 key variables, while structured questionnaire was developed for the 22 critical variables. Firstly, the hierarchical relationships among 11 key variables were identified using Interpretive Structural Modeling (ISM). Subsequently, the importance levels of 22 critical variables were identified through Cronbach's alpha (α), frequency, and relative importance index (RII) analyses. According to the hierarchical structural modeling, the process that begins with uncontrolled migration concludes with urban transformation. Statistical analysis results have determined that one of the most significant causes of squatting and illegal construction is the lack of supervision. Additionally, the results indicate that squatting and illegal construction render cities vulnerable to natural disasters.

Keywords: Resilient urbanization, Sustainable urbanization, Sustainable development goals, Sustainable cities

***Corresponding author**: Sakarya University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 54100, Sakarya, Türkiye
E mail: eeken@sakarya.edu.tr (E. DOBRUCALI)
Mahmut Esat ÇAKMAK https://orcid.org/0009-0001-3523-7644
Esra DOBRUCALI https://orcid.org/0000-0002-7852-7078

Received: January 6, 2025
Accepted: February 11, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Cakmak ME, Dobrucali E. 2025. Determination of critical variables for resilient urbanization. BSJ Eng Sci, 8(3): 616-626.

1. Introduction

A city is a settlement where people carry out their economic, cultural, and social activities, live and work as a community, and where more opportunities are offered to people compared to rural areas. The urbanization of a settlement fundamentally occurs with an increase in its population, and consequently, its built environment, as well as its economic, cultural, and social opportunities (Susmaz and Ekinci, 2009). The main reasons for the development of cities can be attributed to the agricultural and industrial revolutions. The agricultural revolution led to the beginning of settled life and the formation of small settlements, while the industrial revolution caused migration from rural areas to cities due to mechanized production. These migration movements also accelerated urbanization. Agricultural mechanization has led to unemployment in rural areas, while industrialization has increased the demand for labor in urban areas (Kayan, 2012). Urban transformation refers to activities where all emerging problems of a developing city, including social, economic, physical, environmental, climatic, and so on, are addressed, and comprehensive solutions are generated for these issues over time (Thomas, 2003). The concepts of city and urbanization should not be evaluated unilaterally but should be considered from economic, political, demographic, and sociological perspectives. As society urbanizes economically, politically, demographically, and sociologically, it must also geographically urbanize with its structures, streets, avenues, and facilities physically adapting to urbanization. Up to the present, many researchers have recognized the importance of urbanization and the practices within the urbanization process, conducting various studies on these topics. These studies are categorized and summarized below according to their subjects. Işık (2005), Susmaz and Ekinci (2009), Esen (2023) and Küçükdağ (2023) have worked on urbanization. In his study, Işık (2005) examined the urbanization models in Türkiye caused by industry, tourism, and terrorism. Susmaz and Ekinci (2009) focused on healthy urbanization. This study identified the processes leading to unhealthy urbanization and provided solutions based on the role of local governments. In his study, Esen (2023) evaluated disaster-resistant cities around the world and provided an assessment for Türkiye. Küçükdağ (2023) focused on the impact of migrations on urbanization. Torlak (2003), TMMOB (2004) and Keleş (2023) have worked on slums and illegal constructions. Torlak (2003) conducted a study on the history and process of slum development in Türkiye, also covering the zoning amnesties enacted during this process. The report prepared by TMMOB Urbanization and Local Governments Working Group

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

(2004) addressed the issue of illegal construction. The report concluded that the housing need triggered by intense migration to cities and the zoning amnesties enacted due to illegal constructions were caused by a lack of control mechanisms and the pursuit of profit. Keleş (2023) investigated the impact of slum development and zoning amnesties on zoning plans in Türkiye. Meşhur (2008), Usta (2021), Inceyol (2021) and Çay and Kandemir (2022) addressed zoning plans and regulations in their studies. Meşhur (2008) analyzed the stages of preparing the subdivision plan that ensures the implementation of the urban zoning plan in the field. Usta (2021) examined the relationship between zoning plans and urban rent. Inceyol (2021) evaluated the implementation of zoning plan changes through examples. Çay and Kandemir (2022) addressed the changes made in Türkiye's zoning regulations. Erbaş (2018), Kasparoğu and Suri (2019), and Bulubay (2021) examined the 2018 zoning amnesty regulation. Erbaş (2018) investigated the impact of the zoning amnesty process on the present and future of cities. Kasparoğlu and Suri (2019) analyzed the zoning amnesty regulation in all aspects and provided recommendations for the legal, economic, and social conditions necessary for resilient urbanization. Bulubay (2021) conducted an evaluation specifically for Istanbul's historic peninsula. Genç (2008), Karabulut (2019) and Çakır (2023) have worked on urban transformation. Genç (2008) identified the reasons for the need for urban transformation in Türkiye and examined the implementation processes. Karabulut (2019) evaluated urban transformation from legal and social perspectives. Çakır (2023) addressed the deficiencies and problematic aspects of urban transformation projects according to current conditions, highlighting the problems and time losses in urban transformation projects in Istanbul. Incorrect and incomplete practices in urbanization processes make cities vulnerable to disasters. An excess of slums without engineering services, illegal constructions lacking engineering services, and structures that have outlived their economic lifespan reduce the disaster resilience of cities, leading to significant loss of life and property when disasters occur. The importance of resilient urbanization was better understood following the significant losses caused by the 1999 Gölcük and Düzce Earthquakes in our country. The recent Pazarcik and Elbistan earthquakes have also highlighted the importance of resilient urbanization. Additionally, the goal of creating sustainable cities and communities is also included among Türkiye's Sustainable Development Goals. Among the main targets of this goal is “By 2020, substantially increase the number of cities and human settlements adopting and implementing integrated policies and plans towards inclusion, resource efficiency, mitigation and adaptation to climate change, resilience to disasters, and develop and implement, in line with the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030, holistic disaster risk management at all levels” (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019). The aim of this study is to list the fundamental and critical variables in resilient urbanization in Türkiye based on a literature review, reveal the hierarchical structure of the relationships among these key variables, and rank the critical variables by their significance.

2. Materials and Methods

The loss of lives and property caused by natural disasters highlights the importance of resilient urbanization. However, a range of variables hinder the successful implementation of urbanization. In this context, the aim of this study is to list the fundamental and critical variables in resilient urbanization based on a literature review, reveal the hierarchical structure of the relationships among these key variables, and rank the critical variables by their significance. This study consists of four stages. The first stage involves identifying the fundamental and critical variables based on the literature, the second stage focuses on the preparation and administration of the questionnaire, the third stage entails developing an interpretive model for the fundamental variables, and the final stage includes performing statistical analyses for the critical variables and establishing their order of importance.

2.1. Identifying the Fundamental and Critical Variables

In the first stage, a literature review was conducted to create a comprehensive list of variables shown in Table 1 and Figure 1.

2.2. Creation of the Questionnaire

In the second stage, two questionnaires, one semi-structured and the structured, were prepared based on the variable list. In the semi-structured questionnaire, the fundamental variables were designed in accordance with the Interpretive Structural Model, while the structured questionnaire was prepared for critical variables. The structured questionnaire used a 5-point Likert Scale, with importance levels structured as "1=Not at all important, 2= Somewhat important, 3= Moderately important, 4= Very important, 5= Extremely important”. The semi-structured questionnaire was administered to 4 experts, while the structured questionnaire was conducted with 160 experts in the field of urbanization.

2.3. Interpretive Structural Model

In the third stage, the relationship between the key variables has been determined through Interpretive Structural Modeling (ISM). Interpretive Structural Modeling first categorizes the influential factors in a problem, constructs a layered hierarchical model, and determines the solution to the problem. In other words, this method is used to identify the effects of factors on other factors (Çankaya, 2022; Sağlam, 2023). This method not only identifies direct relationships but also incorporates indirect relationships into the solution (You et al., 2024). Through this approach, the problem becomes defined, simplified, and interpretable (Raut et al., 2017; Sağlam, 2023). The first step in interpretive structural modeling (ISM) analyses is determining the contextual

relationships. In this relationship: Y indicates that variable i unidirectionally affects variable j; Z indicates that variable j unidirectionally affects variable i; X indicates that variables i and j mutually affect each other; O indicates that variables i and j do not affect each other. After this step, the indirect relationships are determined, and the Reachability Matrix is created, where a value of 0 is assigned for O, and a value of 1 is assigned for X, Y, and Z. Later, For Level Partition, the Reachability Set (i), Antecedent Set (j), and their Intersection are determined. Finally, the mutual relationships are determined (Tan et al., 2019).

Table 1. Naming of fundamental and critical variables (Çakmak, 2024)

ID	Fundamental variables	ID	Critical variables
E1	Uncontrolled migration	D1	One of the main causes of slum development and illegal construction may be uncontrolled migrations.
E2-E3	Slums Illegal construction	D2	One of the most important reasons for illegal construction and slum development could be the inability to carry out inspections effectively and on time.
		D4	Settlements formed by slums and illegal structures can make it difficult to create ideal urban plans.
		D5	Settlements formed by slum and illegal construction may be vulnerable to disasters, especially earthquakes.
E4	Unplanned/unplanned urbanization	D3	One of the main reasons for unplanned/irregular urbanization could be the slum development and illegal construction that emerged after uncontrolled migration from rural areas to cities due to industrialization.
E5	Confusion of zoning legislation	D20	Due to issues encountered in the zoning process and the fragmented and complex nature of the legislation, there may be a need for a new approach to spatial planning.
E6	Zoning amnesty/peace regulations	D6	Zoning amnesties/regulations can be defined as legal arrangements that are forced to be introduced at the end of slum and illegal construction processes.
		D7	Zoning amnesty/regulations may lead to the perception of 'another zoning amnesty will be issued' and, as a result, an increase in the tendency towards slum development and illegal construction.
		D8	Zoning amnesty/regulations may cause an increase in slums and illegal structures.
		D9	Zoning amnesty/regulations may not have provided a solution to the problem of slum development and illegal construction.
		D10	Rather than contributing to the solution of urbanization and zoning problems, zoning amnesty/regulations may cause the deterioration of the current situation.
		D11	Structures included in the zoning amnesty/regulations may not be resistant to disasters, especially earthquakes.
		D12	Zoning amnesty/regulations may lead to the creation of vulnerable cities.
		D13	In order to form disaster-resistant, ideal cities, it may be appropriate not to implement legal arrangements such as zoning amnesty.
		D14	Zoning amnesty/regulations may make it difficult to implement urban plans.
		D16	The most recent zoning amnesty regulation can be considered appropriate in terms of identifying unregistered structures that violate zoning laws.
		D17	The zoning amnesty has become a regulation that registers illegal structures and enables the identification of places and buildings that can be subject to urban transformation.
E7	Zoning penalties not being implemented/not being implemented	D15	Zoning amnesty/regulations may have allowed the resolution of zoning problems, generated income for the state, and provided solutions to construction projects subject to demolition or fines.
E8	Subdivision plans not being made/not being made	D21	More attention by the relevant municipalities to the preparation of parceling plans, as required by Article 5/12 of "Planlı Alanlar Imar Yonetmeligi" for construction, could be the right approach for achieving ideal urbanization.
E9	Ideal city plans not being made/not being made	D18	For a city to be planned and grow properly, it is possible through the preparation of plans in accordance with proper and long-term planning criteria and adhering to these plans except in unavoidable circumstances.
E10	Changes in city plans	D19	Frequent changes made to the city's plans may cause a deviation from the original purposes of the plans
E11	Urban transformation	D22	In Türkiye, the renewal of unplanned/irregular and vulnerable cities through urban transformation practices may be a necessary application.

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20	D21	D22
Torlak, 2003			x				x															
Susmaz ve Ekinci, 2009	x																					
Uzuncibuk, 2009				x															x			
Karabel, 2014				x					x		x											
Planlı Alanlar Imar Yönetmeliği., 2017																					x	
Erbaş, 2018;									x			x	x									
Akalın, 2018	x		x							x								x				
Özelmacıklı ve Baz, 2018																x						
Özlüer, 2018;															x		x					
Tercan, 2018					x	x		x														
Kasparoğlu ve Suri, 2019											x	x				x	x					
Bulubay, 2021		x			x	x			x					x								
Inceyol, 2021																		x	x			
Turhan, 2021															x							
Usta, 2021																			x			
Uysal, 2021	x																					
Esen, 2023																				x		
Keleş, 2023		x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x						x		
Köse et al., 2023				x																		x
Erdoğan and Babaoğlu, 2024																						x

Figure 1. Critical variables in the Urbanization Process (Çakmak, 2024).

2.4. Statistical Analyses

In the final stage, the data set was evaluated using statistical analyses. These analyses consist of three stages. In the first analysis stage, general information about the participants was gathered; in the second stage, frequency analysis was conducted; and in the third stage, the Relative Importance Index (RII) analysis was applied to rank the critical variables in implementing resilient urbanization. The questionnaire contains questions related to the 22 critical variables grouped under 4 main variables (Table 1). A data set was created based on the responses of the 160 questionnaire participants to these questions, and statistical analyses were conducted using this data set. The applied analyses include Cronbach's alpha (α), frequency analysis, and Relative Importance Index (RII) analysis. SPSS 29.0.2.0 was used for the analyses. The first analysis conducted was the Cronbach's alpha (α) analysis, which aims to determine the reliability of the questionnaire. As the Cronbach's alpha value approaches 1, the reliability of the questionnaire increases (Yockey, 2016). A Cronbach's alpha (α) value greater than 0.60 is considered good, while a value greater than 0.80 is considered excellent (Cronbach, 1951; Abbasianjahromi et al., 2019; Elmalı and Bayram, 2022). The second analysis is frequency analysis. This analysis shows how many measurements were taken for each measurement (Arıcı, 1998). The frequency analysis results obtained from the frequency analysis are also used in the Relative Importance Index (RII) Analysis. The final analysis method applied in the study is the Relative Importance Index (RII). This method allows for determining the importance index of each factor on a specific scale and comparing it with other factors (Naji, et al., 2022; Youssefi and Çelik, 2023). This method has been applied by many researchers in their past studies related to the construction sector, and it has been found to be an effective method for ranking variables (Kometa et al., 1994; Sambasivan and Soon, 2007; Gündüz et al., 2013, Alaloul et al., 2020; Demirkesen and Tezel, 2021; Elmalı, and Bayram, 2022). In the context of the study, the Relative Importance Index (RII) for each identified variable was computed individually in accordance with Equation (1) presented below.

$$RII = \frac{((5 * X5) + (4 * X4) + (3 * X3) + (2 * X2) + (1 * X1))}{Q * N} \quad (1)$$

In the equation; RII represents the relative importance index, X represents the frequency analysis results, Q represents the highest level of importance, and N represents the total number of questionnaires.

3. Results

In this context, the results of semi-structured and structured questionnaires, interpretive structural modeling, and statistical analyses are presented in order. The semi-structured questionnaire was conducted by

obtaining the opinions of four experts. Detailed information about the experts is provided in Table 2. The first section of the structured questionnaire includes general information about the participants, such as their education level, experience, position within the company, and expertise. Of the participants, 43.12% are civil engineers, 15.00% are urban and regional planning experts, and 14.38% are architects. Regarding education, 59.38% of the participants have a bachelor's degree, 30.62% have a master's degree, and 6.25% have a doctoral degree. In terms of experience, 14.38% of the participants have more than 20 years of experience, 17.50% have 16 to 20 years of experience, and 36.88% have 11 to 15 years of experience. Regarding their employment, 51.88% work in municipalities, 11.25% work in ministries or directorates affiliated with ministries, and 32.50% work in the private sector. Detailed information about the participants is provided in Table 2. The first step in interpretive structural modeling (ISM) analyses is determining the contextual relationships. According to the authors, contextual relationships among the eleven variables are established and presented in Table 3. In the next step, the Reachability Matrix is created and presented in Table 4.

Table 2. The properties of the respondents

	Categories		Percentage (%)
Semi-structured questionnaire	Departments where participants received training	Civil Engineering	75.00
		Architecture	25.00
	Educational status of participants received questionnaire	Master's degree	75.00
		Bachelor's degree	25.00
	Working periods of participants in the construction sector	11-15 years	50.00
		6-10 years	50.00
Structured questionnaire	Departments where participants received training	Civil Engineering	43.12
		City Regional Planning	15.00
		Architecture	14.38
		Topographical Engineer	12.50
		Technician	6.25
		Others	8.75
	Educational status of participants received questionnaire	Doctorate degree	6.25
		Master's degree	30.62
		Bachelor's degree	59.38
		Associate degree	3.75
	Working periods of participants in the construction sector	More than 20 years	14.38
		16-20 years	17.50
		11-15 years	36.88
		6-10 years	10.62
		0-5 years	20.62
	Institutions where participants work	Ministry or Directorates affiliated to the Ministry	11.25
		Municipality	51.88
		Private sector	32.50
		University	4.37

Table 3. Contextual relationships

	E11	E10	E9	E8	E7	E6	E5	E4	E3	E2
E1	Y	O	Y	Y	O	Y	Y	Y	Y	Y
E2	Y	O	Y	Y	X	X	Y	Y	Y	
E3	Y	O	Y	Y	X	X	Y	Y		
E4	Y	X	Y	X	Z	X	Z			
E5	Y	Y	Y	Y	O	O				
E6	Y	Y	X	Y	Y					
E7	Y	O	O	O						
E8	Y	Y	Z							
E9	Y	X								
E10	Y									

E1=Uncontrolled migration, E2= Slums, E3= Illegal construction, E4= Unplanned/unplanned urbanization, E5= Confusion of zoning legislation, E6 Zoning amnesty/peace regulations, E7= Zoning penalties not being implemented/not being implemented, E8= Subdivision plans not being made/not being made, E9= Ideal city plans not being made/not being made, E10= Changes in city plans, E11= Urban transformation.

Table 4. Reachability matrix

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11
E1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E3	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
E4	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
E5	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
E6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
E8	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
E9	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
E10	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1
E11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

E1=Uncontrolled migration, E2= Slums, E3= Illegal construction, E4= Unplanned/unplanned urbanization, E5= Confusion of zoning legislation, E6 Zoning amnesty/peace regulations, E7= Zoning penalties not being implemented/not being implemented, E8= Subdivision plans not being made/not being made, E9= Ideal city plans not being made/not being made, E10= Changes in city plans, E11= Urban transformation. Bold colors indicate indirect relationships.

In the third step of the analysis, the results of the level partitioning, determined by the Reachability Set, Antecedent Set, and their Intersection, are presented in Table 5. In the final step, the mutual relationships among the fundamental variables in Resilient Urbanization have been determined. This hierarchical relationship is shown in Figure 2. The first stage of this hierarchy is Uncontrolled Migration (E1), and the highest level is determined as Urban Transformation (E11). The interpretive structural modeling results show that the problematic processes, starting with “uncontrolled migration”, are followed by "Slums," "Illegal construction," and "Zoning penalties not being implemented/not enforced." At the next level, it was determined that the challenge "Confusion of zoning legislation" is followed by the variables "Unplanned/poor urbanization," "Zoning amnesty/peace regulations," " Subdivision plans not being made/not implemented," "Ideal city plans not being made/not implemented," and "Changes in city plans." At the highest level of this hierarchical structure, "Urban transformation" has been identified. This challenge model, which starts with uncontrolled migration, shows that urban transformation is at the highest level.

Table 5. Results of level partitions

ID	Reachability Set	Antecedent Set	Intersection	Level
E1	E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11	E1	E1	5
E2	E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11	E1, E2, E3, E4, E6, E7, E8, E9,	E2, E3, E4, E6, E7, E8, E9,	4
E3	E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E11	E1, E2, E3, E4, E6, E7, E8, E9	E2, E3, E4, E6, E7, E8, E9,	4
E4	E2, E3, E4, E6, E7, E8, E9, E10, E11	E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10	E2, E3, E4, E6, E7, E8, E9, E10	2
E5	E4, E5, E6, E8, E9, E10, E11	E1, E2, E3, E5, E6, E7	E5, E6	3
E6	E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11	E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10	E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10	2
E7	E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E11	E1, E2, E3, E4, E6, E7, E8, E9	E2, E3, E4, E6, E7, E8, E9	4
E8	E2, E3, E4, E6, E7, E8, E9, E10, E11	E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10	E2, E3, E4, E6, E7, E8, E9, E10	2
E9	E2, E3, E4, E6, E7, E8, E9, E10, E11	E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10	E2, E3, E4, E6, E7, E8, E9, E10	2
E10	E4, E6, E8, E9, E10, E11	E1, E2, E4, E5, E6, E8, E9, E10	E6, E8, E9, E10	2
E11	E11	E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11	E11	1

E1=Uncontrolled migration, E2= Slums, E3= Illegal construction, E4= Unplanned/unplanned urbanization, E5= Confusion of zoning legislation, E6 Zoning amnesty/peace regulations, E7= Zoning penalties not being implemented/not being implemented, E8= Subdivision plans not being made/not being made, E9= Ideal city plans not being made/not being made, E10= Changes in city plans, E11= Urban transformation.

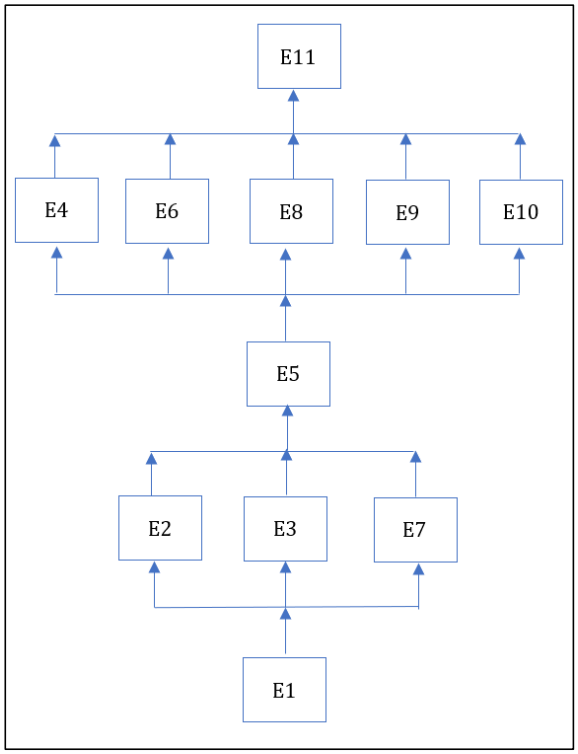


Figure 2. Interpretive structural modeling of fundamental variables for resilient urbanization.

In the fourth stage of the study, statistical analyses were performed using data identified through a questionnaire for the critical variables. These analyses include Cronbach's alpha (α), frequency, and Relative Importance Index (RII). The Cronbach's alpha (α) coefficient was determined to be 0.965. This value indicates that the questionnaire provides reliable results. The second analysis conducted in the stage is frequency analysis. The results of the frequency analysis for this study are shown in Table 6. The final analysis method applied in the stage is the Relative Importance Index (RII). The calculated RII results for this study are shown in Figure 3. In the Figure 3, values above 0.85 are identified as challenges of high importance and are highlighted in red. Variables with an importance level of 0.7 or higher are shown in blue, while those with lower importance are highlighted in yellow. According to this analysis results, "One of the most important reasons for illegal construction and slum development could be the inability to carry out inspections effectively and on time (D2)" and "Settlements formed by slum and illegal construction may be vulnerable to disasters, especially earthquakes (D5)" are variables with high importance. These variables are followed by " Zoning amnesty/regulations may lead to the perception of 'another zoning amnesty will be issued' and, as a result, an increase in the tendency towards slum development and illegal construction (D7)," " Structures included in the zoning amnesty/regulations may not be resistant to disasters, especially earthquakes (D11)" and "Zoning amnesty/regulations may lead to the creation of vulnerable cities (D12)".

Table 6. Frequency analysis results (%)

ID	Extremely Important	Very Important	Moderately Important	Somewhat Important	Not at all Important
D1	41.3	40.6	3.1	6.9	8.1
D2	60.0	28.8	1.3	3.1	6.9
D3	39.4	37.5	6.9	7.5	8.8
D4	54.4	31.9	1.9	3.8	8.1
D5	65.6	19.4	3.8	1.9	9.4
D6	23.8	26.3	9.4	19.4	21.3
D7	56.9	28.8	4.4	1.9	8.1
D8	53.1	31.9	3.8	4.4	6.9
D9	50.0	33.8	5.0	3.8	7.5
D10	53.8	30.0	4.4	4.4	7.5
D11	56.3	30.0	3.1	1.9	8.8
D12	56.3	30.6	3.1	1.3	8.8
D13	50.6	28.1	8.8	2.5	10.0
D14	53.1	29.4	3.8	4.4	9.4
D15	15.6	21.9	19.4	27.5	15.6
D16	10.6	23.1	18.8	26.9	20.6
D17	8.1	23.1	21.3	29.4	18.1
D18	61.3	23.8	3.8	3.1	8.1
D19	51.9	28.1	5.0	6.9	8.1
D20	33.1	38.1	15.0	5.0	8.8
D21	45.6	35.0	8.1	2.5	8.8
D22	52.5	29.4	3.8	5.0	9.4

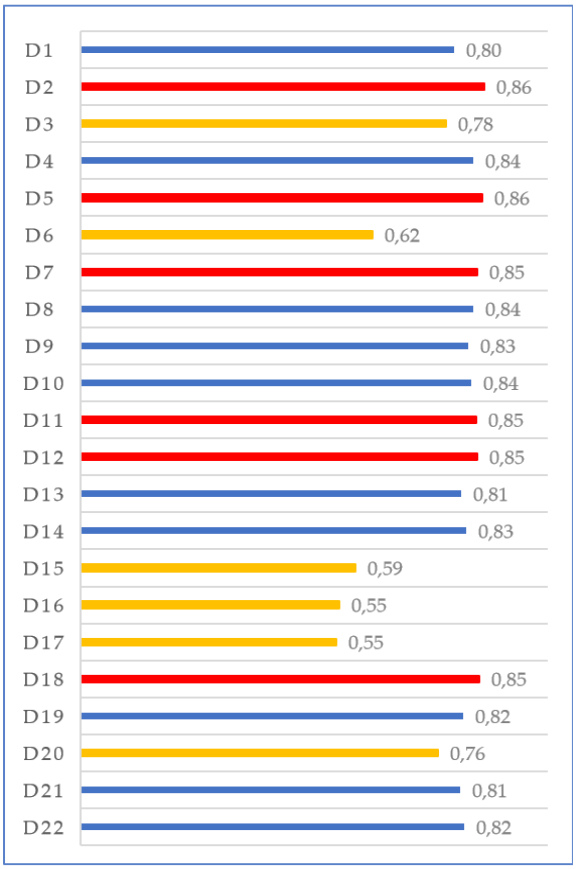


Figure 3. RII analysis results

"Zoning amnesty/regulations may have allowed the resolution of zoning problems, generated income for the state, and provided solutions to construction projects subject to demolition or fines (D15)", "The most recent zoning amnesty regulation can be considered appropriate in terms of identifying unregistered structures that violate zoning laws (D16)" and " The zoning amnesty has become a regulation that registers illegal structures and enables the identification of places and buildings that can be subject to urban transformation (D17)" are the critical variables with the lowest importance.

4. Discussion

This study was conducted to identify the key and critical variables in resilient urbanization. Initially, 11 key and 22 critical variables were identified and grouped for resilient urbanization in Türkiye. Subsequently, using interpretive structural modeling, the authors identified the hierarchical relationships among 11 key variables. The interpretive structural model obtained has identified migration as the first-tier variable for Resilient Urbanization. The literature includes publications that emphasize the interconnection between industrialization, migration, and urbanization. According to these studies, industrialization has led to an increase in rural-to-urban migration (Sağlam, 2006; Kasparoğlu and Suri, 2019). In the second tier of the interpretive structural model, the

variables "Zoning penalties not being implemented," "Slums," and "Illegal construction" are included. Studies emphasize that the primary cause of slums and illegal construction is migration. In other words, the housing demand that arises following rural-to-urban migration has led to the development of slums and illegal structures (Uşak and Yalçın, 2019; Tekinel and Güvercin, 2000; Küçükdağ, 2023). The subsequent tiers of the model include variables related to zoning (regulations and amnesty/reconciliation) and planning. At the final tier, urban transformation is positioned. These results support the findings of previous studies conducted on this subject. According to Günaydın (2015), the need for urban transformation projects in Türkiye emerges alongside urbanization problems, and the migration movements underlying this need have shaped the landscapes of today's cities. Subsequently, a questionnaire was designed for the 22 critical variables identified in this study and was administered to 160 experts. The data set created based on the questionnaire results was evaluated using statistical analyses, including Cronbach's alpha (α), frequency analysis, and the Relative Importance Index (RII). According to this analysis results, "One of the most important reasons for illegal construction and slum development could be the inability to carry out inspections effectively and on time (D2)" and "Settlements formed by slum and illegal construction may be vulnerable to disasters, especially earthquakes (D5)" are variables with high importance. According to Karabel (2014) slum development, illegal construction, and buildings that have reached the end of their economic lifespan are among the most significant issues, particularly in cities with high earthquake risk. Gezer (2014) has stated that most areas in need of urban transformation are slum zones. Additionally, according to Gezer (2014), another factor that increases the necessity for urban transformation in Türkiye is earthquakes.

5. Conclusion

In conclusion, the fundamental variables for Resilient Urbanization are listed in order as migration, slum development and illegal construction, issues and changes related to zoning, and issues and changes related to urban plans. At the top of this hierarchical structure lies urban transformation. Statistical analysis results have determined that one of the most significant causes of squatting and illegal construction is the lack of supervision. Additionally, the results indicate that squatting and illegal construction render cities vulnerable to natural disasters. This study has certain limitations. These limitations can include the sample set of questionnaire participants. Changes in the participant set may lead to relatively minor variations in the results.

Based on the results of this study, the following criteria are suggested for ideal urbanization:

- Prioritizing the implementation of urban transformation projects, especially in cities with low resilience.
- Ensuring the control of uncontrolled migration movements.
- Preventing construction that violates zoning regulations, such as slum development.
- Increasing inspections by relevant authorities and applying penal actions.
- Ensuring the preservation of ideal urbanization in zoning regulations.

Future studies could explore and compare the barriers to resilient urbanization in different countries.

Author Contributions

The percentages of the authors' contributions are presented below. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

	M.E.Ç.	E.D.
C	60	40
D	60	40
S	40	60
DCP	60	40
DAI	60	40
L	60	40
W	60	40
CR	40	60
SR	30	70
PM	50	50

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

The authors confirm that the ethical policies of the journal, as noted on the journal's author guidelines page, have been adhered to. The questionnaire survey procedures were approved by the Ethics Committee of Sakarya University, Sakarya, Türkiye (Approval date: 30.07.2024, protocol code: E-61923333-050.99-383795).

Acknowledgements

This article is derived from the master's thesis titled "Türkiye'de Dirençli ve İdeal Kentleşmeye Engel Olan Sorunlu Süreçler", prepared by Mahmut Esat Çakmak under the supervision of Dr. Esra Dobrucalı.

References

Abbasianjahromi H, Ahangar M, Ghahremani F. 2019. A maturity assessment framework for applying BIM in consultant companies. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng, 43: 637–649.

Akalın M. 2018. Kente karşı işlenen suçların faili imar afları. Ankara: İksad Yayınevi, Ankara, Türkiye, pp: 50.

Alaloul WS, Liew MS, Zawawi NAWA, Kennedy IB. 2020. Industrial Revolution 4.0 in the construction industry:

Challenges and opportunities for stakeholders. Ain Shams Eng J, 11(1): 225-230.

Arıcı H. 1998. İstatistik: yöntemler ve uygulama. Meteksan. Ankara, Türkiye, pp: 56.

Bulubay C. 2021. Investigation of negative effects of zoning peace on urban conservation from the perspective of Istanbul historical peninsula. Planlama Derg, 31(3): 480–499.

Çakır E. 2023. 21. Yüzyılda kentsel dönüşüm ve yeni eğilimler. Meriç Uluslararası Sos Stratejik Araşt Derg, 7(18): 118–144.

Çakmak ME. 2024. Türkiye'de dirençli ve ideal kentleşmeye engel olan sorunlu süreçler. M.S. thesis, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, pp: 96.

Çankaya SY. 2022. Kapalı döngü tedarik zinciri uygulamalarını etkileyen faktörlerin yorumlayıcı yapısal modelleme ve MICMAC yöntemleri ile analizi. Yönetim Bilimleri Derg, (Özel Sayı): 1–25.

Çay T, Kandemir ES. 2022. Türkiye'de imar uygulama mevzuatındaki gelişim süreci. Geomatik Derg, 7(1): 26–40.

Cronbach LJ. 1951. Coefficient alpha and the internal structure of tests. Psychometrika, pp: 297–334.

Demirkesen S, Tezel A. 2022. Investigating major challenges for industry 4.0 adoption among construction companies. Eng Constr Archit Manag, 29(3): 1470-1503.

Elmalı Ö, Bayram S. 2022. Adoption of BIM concept in the Turkish AEC industry. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng, 46(1): 435–452.

Erbaş İ. 2018. Kimileri için fırsat, kent için ise tehdit: İmar barışı. Mimarlık Derg, Mimarlar Odası, 403: 27–30.

Esen A. 2023. Dirençli şehirler oluşturma ve afet zararlarını azaltmada kamu yönetiminin yeri. Avrasya Dosyası Derg, 14(1): 8–88.

Genç FN. 2008. Urban transformation in Türkiye: General view of legislation and practices. CBU J Manag Econ, 15(1): 115–130.

Gezer İ, 2014. Kentsel dönüşüm; Ne, niçin, nasıl?. SosyalPolitika, 41.

Günaydın B. 2015. Kentsel dönüşümün öncülü ve ardılı olarak göç: Zeytinburnu Sümer Mahallesi örneği. Göç Araşt Derg, 1(2): 84–111.

Gündüz M, Nielsen Y, Özdemir M. 2013. Quantification of delay factors using the relative importance index method for construction projects in Türkiye. J Manag Eng, 29(2): 133-139.

IBM Corp. Released 2023. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 29.0.2.0 Armonk, NY: IBM Corp

Inceyol Y. 2021. Uygulama imar planı tadilatlarında plan değişikliği ölçütlerine uygunluğun araştırılması. Gümüşhane Univ Fen Bilim Derg, 11(4): 1324–1339.

Işık Ş. 2005. Türkiye'de kentleşme ve kentleşme modelleri. Ege Coğrafya Derg, 14: 57–71.

Karabel AH. 2014. Şehirlerimiz etkin bir kentsel dönüşüme muhtaçtır. SosyalPolitika, 14.

Karabulut S. 2019. Urban transformation at the scale of development plan in developing residential areas: The case of Elazığ. M.S. thesis, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, pp:56.

Kasparoğlu M, Suri L. 2019. İmar barışı. İstanbul Ticaret Univ Teknol Uygul Bilim Derg, 2(1): 47–60.

Kayan A. 2012. Regional planning in Türkiye: Problems and solutions. Mustafa Kemal Univ Sos Bilim Enst Derg, 9(20): 103–134.

Keleş I. 2023. Türkiye'de imar aflarının imar yasaları ve imar planlarına etkisi. Sos Beşerî İdarî Bilim Derg, 6(7): 969–990.

Kometa ST, Olomolaiye PO, Harris FC. 1994. Attributes of UK construction clients influencing project consultants' performance. Constr Manag Econ, 12(5): 433-443.

Küçükdağ R, 2023. Kent ve çevre görünümlerine geçmişten günümüze göç olgusunun etkisi. Ulusl Anadolu Sos Bilim Derg, 2(7): 522–531.

Meşhur MÇ. 2008. Arazi ve arsa düzenlemesi sürecinin kentsel mekan oluşumu açısından irdelenmesi. ODTÜ Mimarlık Fak Derg, 25(2): 21–38.

Naji KK, Gündüz M, Falamarzi MH. 2022. Assessment of construction project contractor selection success factors considering their interconnections. KSCE J Civ Eng, 26(9): 3677–3690.

Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği. 2017. Ankara, 30113 sayılı Resmi Gazete.

Raut RD, Narkhede B, Gardas BB. 2017. To identify the critical success factors of sustainable supply chain management practices in the context of oil and gas industries: ISM approach. Renew Sustain Energy Rev, 68: 33–47.

Sağlam S. 2006. Türkiye'de iç göç olgusu ve kentleşme. Hacettepe Univ Türkiyat Araşt Derg, 5: 33–44.

Sağlam YC. 2023. Döngüsel ekonomi önündeki engellerin yorumlayıcı yapısal modelleme ve MICMAC analizi ile değerlendirilmesi. İzmir İktisat Derg, 38(4): 930–950.

Sambasivan M, Soon YW. 2007. Causes and effects of delays in Malaysian construction industry. Int J Proj Manag, 25(5): 517-526.

Susmaz H, Ekinci CE. 2009. Sağlıklı kentleşme süreci esasları. e-J New World Sci Acad, 4(1): 21–34.

T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığ., 2019. Sürdürülebilir kalkınma amaçları değerlendirme raporu, 1–310.

Tan T, Chen K, Xue F, Lu W. 2019. Barriers to building information modeling (BIM) implementation in China's prefabricated construction: An interpretive structural modeling (ISM) approach. J Clean Prod, 219: 949–959.

Tekinel O, Güvercin Ö. 2000. Türkiye'de konut sorununun nedenleri ekonomik ve sosyal boyutu. Fen Mühendislik Derg, 3(2): 7–17.

Thomas SA. 2003. Glossary of regeneration and local economic development. Manchester: Local Economic Strategy Center, Manchester, UK, pp: 49.

TMMOB Kentleşme ve Yerel Yönetimler Çalışma Grubu, 2004. Kaçak yapılaşma ile ilgili süreçler, sorunlar, çözüm önerileri değerlendirme raporu. Planlama Derg, 3: 94–105.

Torlak E. 2003. Gecekondulaşmanın gelişimi imar afları ve ıslah imar planları. Çağdaş Yerel Yön Derg, 12(1): 64–73.

Uşak B, Yalçın G 2019. İmar barışı düzenlemesi üzerine bir içerik analizi. Türkiye Arazi Yön Derg, 1(1): 1–10.

Usta HK. 2021. Planned urbanization and rent relationship: The case of Şanlıurfa. Mustafa Kemal Univ Sos Bilim Enst Derg, 18(48): 1–22.

Yockey RD. 2016. SPSS demystified: A simple guide and reference. United Kingdom: Taylor & Francis, Abingdon, UK, pp: 68.

You B, Chen Z, Xue Y, Zhang Y, Chen K. 2024. Modelling inter-relationships of barriers to smart construction implementation. J Civ Eng Manag, 30(8): 738–757.

Youssefi I, Celik T. 2023. Comparative analysis between different risk score calculation approaches. Eng Constr Archit Manag, 31(10): 4099–4124.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1566475

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)
Cilt 8 - Sayı 3: 627-641 / Mayıs 2025
(Volume 8 - Issue 3: 627-641 / May 2025)

KALP RİTİM BOZUKLUKLARININ ÇOK SINIFLI SINIFLANDIRILMASINDA RELİEFF YÖNTEMİ VE MAKİNE ÖĞRENİMİ TABANLI YAKLAŞIM

Çiğdem Gülüzar ALTINTOP[1]*

[1]*Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Biomedical Engineering, 38039, Kayseri, Türkiye*

Özet: Kardiyovasküler hastalıklar (KVH), dünya genelinde ciddi sağlık tehditleri arasında yer almakta ve tüm ölümlerin yaklaşık %32'sine neden olmaktadır. Bu nedenle, KVH'ların erken tanısı ve uygun tedaviye başlanması hayati önem taşımaktadır. Elektrokardiyografi (EKG), kalbin elektriksel aktivitesinin kaydedilmesiyle elde edilen önemli bir tanı yöntemidir. Ancak, aritmi gibi kalp rahatsızlıklarının tanısı, uzman klinisyenlerin gözle incelemesine dayanmakta ve bu süreç zaman alıcı ve zahmetli olabilmektedir. Bu çalışmada, EKG sinyallerinden otomatik aritmi tespiti için bir bilgisayar destekli sistem geliştirilmesi amaçlanmıştır. Normal sinüs ritmi, pacemaker ritmi ve 15 farklı aritmi olmak üzere toplam 17 farklı kardiyak aktivite; EKG sinyallerinden çok çeşitli öznitelik çıkarımı, ReliefF kullanılarak öznitelik seçimi ve farklı makine öğrenimi algoritmalarını kullanılması ile sınıflandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, K-En Yakın Komşu ve Rastgele Orman algoritmalarının %93,4 ve %99,23 doğruluk oranları ile en yüksek başarıyı gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, aritmilerin çok sınıflı sınıflandırmasında EKG sinyallerinden morfolojik, zaman, frekans, entropi ve karmaşıklık özniteliklerini bir arada çıkararak, farklı makine öğrenimi algoritmaları kullanarak 17 farklı kardiyak aktivite sınıfını yüksek doğruluk oranlarıyla sınıflandırmıştır. Böylece, literatürdeki çalışmalardan farklılaşarak aritminin otomatik sınıflandırılmasına önemli bir katkı sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: Elektrokardiyogram, Aritmi, Öznitelik seçimi, ReliefF, Makine öğrenimi, Sınıflandırma

The ReliefF Method and Machine Learning-Based Approach in the Multi-Class Classification of Cardiac Arrhythmias

Abstract: Cardiovascular diseases (CVDs) represent a significant health threat worldwide and account for approximately 32% of all deaths. Therefore, early diagnosis and timely treatment of CVDs are crucial. Electrocardiography (ECG) is an important diagnostic method that involves recording the electrical activity of the heart. However, the diagnosis of heart disorders, such as arrhythmias, relies on the visual examination of expert clinicians, making this process time-consuming and labor-intensive. This study aims to develop a computer-assisted system for automatic arrhythmia detection from ECG signals. A total of 17 different cardiac activities, including normal sinus rhythm, pacemaker rhythm, and 15 different arrhythmias, were classified using various feature extraction methods from ECG signals, feature selection through ReliefF, and different machine learning algorithms. The results obtained show that the K-Nearest Neighbors and Random Forest algorithms achieved the highest accuracies of 93.4% and 99.23%, respectively. This study distinguishes itself from existing literature by extracting morphological, temporal, frequency, entropy, and complexity features from ECG signals for multi-class classification of arrhythmias and successfully classifying the 17 different cardiac activity classes with high accuracy. Thus, it provides a significant contribution to the automatic classification of arrhythmias.

Keywords: Electrocardiogram, Arrhythmia, Feature selection, ReliefF, Machine learning, Classification

***Sorumlu yazar (Corresponding author):** Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Biomedical Engineering, 38039, Kayseri, Türkiye
E mail: cigdemacer@erciyes.edu.tr (Ç. G. ALTINTOP)
Çiğdem Gülüzar ALTINTOP https://orcid.org/0000-0001-8632-3385

Gönderi: 13 Ekim 2024 **Received:** October 13, 2024
Kabul: 22 Şubat 2025 **Accepted:** February 22, 2025
Yayınlanma: 15 Mayıs2025 **Published:** May 15, 2025

Cite as: Altıntop ÇG. 2025. The ReliefF method and machine learning-based approach in the multi-class classification of cardiac arrhythmia. BSJ Eng Sci, 8(3): 627-641.

1. Giriş

Kardiyovasküler hastalıklar (KVH) günümüzde insan sağlığını tehdit eden ciddi hastalıklardan biridir. Dünya Sağlık Örgütü'nün (DSÖ) raporlarına göre, gerçekleşen tüm ölümlerin yaklaşık %32'sine tekabül eden 17,9 milyon insan KVH'lardan ölmüştür. Bu nedenle günümüzde tüm ölüm nedenleri arasında ilk sırada yer almaktadır. KVH'lardan meydana gelen ölümlerin %75'inden fazlası gelişmekte olan ülkelerde meydana gelmektedir. Çünkü düşük ve orta gelirli ülkelerde yaşayan insanlar genellikle KVH için risk faktörleri olan kişilerin erken teşhisi ve tedavisi için gerekli sağlık programlarından yararlanamamaktadır (Organization, 2021). Ayrıca DSÖ'nün raporuna göre KVH yaygınlığı ve mortalitesi hala artmaktadır. Bu nedenle hastalığın erken tanısı ve uygun tedaviye başlanması hayati önem taşımaktadır. KVH tanısı, çok yönlü bir değerlendirme gerektirmekte ve genellikle hastanın öyküsü, kan testleri, stetoskop ile kalbin dinlenmesi, Elektrokardiyografi (EKG), ekokardiyografi (EKO) gibi yöntemler bir arada kullanılarak konulmaktadır.

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

Bu yöntemlerden EKG kalbin elektriksel aktivitesinin kayıt altına alınmasıdır. EKG, milyonlarca kardiyak hücrenin depolarizasyon potansiyelinin toplamı sonucu üretilir. Normal bir EKG sinyali, kalp atışının belirli kısımlarını temsil eden P, Q, R, S, T ve U dalgalarından oluşmaktadır. P dalgası atriyumlar (kulakçık) kasıldığında ortaya çıkmaktadır. Normal bir EKG'de P dalgasının genliği 0,25 mV'nin altındadır. Bu nedenle, daha yüksek genliğe sahip bir P dalgası atriyumlarda işlev bozukluğunun işareti olabilmektedir (Kossmann, 1953). Aritmi (kalp ritim bozukluğu), kalbin anormal elektriksel aktivitesinden kaynaklanan bir kalp rahatsızlığıdır. Her aritmi yaşamı tehdit edici değildir. Ventriküler flutter ve ventriküler fibrilasyon gibi birkaç kardiyak aritmi ani ölüme, hemodinamik çöküşe ve kalp durmasına neden olabilmektedir (Huikuri vd., 2001). Farklı aritmi türleri, kalpte genellikle farklı mekanizmalarla oluşur ve her biri için farklı bir tedavi yaklaşımı gerektirir (Gopinathannair vd., 2015). Aritmiler, girişimsel olmayan, ucuz ve uygulaması kolay olan EKG kullanılarak tanı almaktadır. Tanı uzman klinisyen tarafından EKG sinyalindeki dalgaların genliği, süresi ve düzenliliği ölçülerek ve normal sınırlarla karşılaştırılarak konmaktadır. Ancak, genliğin ve frekans bileşenlerinin, manuel yöntem kullanan bir klinisyen için doğru ve tutarlı bir şekilde tespit edilmesi çok zahmetlidir. Ayrıca doğru tanının konması için uzun süreli EKG kayıtlarının alınması, hekimin incelemesi açısından zaman alıcı ve uğraştırıcıdır. Daha da önemlisi, aritmi tespitinin uzun çalışma saatlerinin yorgunluğu ve gözle hekim tarafından incelenmesi nedeniyle gözden kaçırılabilmektedir (Shilaskar ve Ghatol, 2013). Sonuç olarak görsel inceleme yanlış tanıya ve yanlış sınıflandırmaya yol açabilmektedir. Hekimler, karmaşık yapıları, bilinmeyen mekanizmaları ve klinik ilişkileri nedeniyle de aritmilerin teşhisinde zorlukla karşılaşmaktadır (Goldberger vd., 2017). Ani kardiyak ölümüne neden olabileceği için ölümcül aritmileri mümkün olan en erken zamanda doğru bir şekilde tespit etmek ve teşhis etmek çok önemlidir.

Klinik ortamlarda çekilen EKG'ler genellikle doktorların kalbin aktivitesini kapsamlı bir şekilde incelemeleri için yeterli değildir. Bazı aritmiler, EKG veya Efor gibi yöntemlerle teşhis edilememektedir. Bu nedenle, şüpheli aritmilerin teşhisi genellikle hastaların günlük aktiviteler sırasında kalbin işleyişini sürekli olarak izlemek için holter cihazı ile birkaç gün (bir veya iki gün) kalp atımı kayıt altına alınmaktadır (Zimetbaum ve Goldman, 2010). Tabi holter cihazıyla alınan sonuçlar ve EKG kayıtlarının yorumlanması anormal kalp atışlarının tanımlanmasına dayanır ve bu da manuel olarak yoğun bir işlemdir. Bu nedenle, kısa süreli EKG sinyalleri kullanılarak aritmilerin bilgisayar destekli tanısı, klinisyenlerin kardiyovasküler hastalıkları önemli ölçüde yönetmesine yardımcı olacaktır. Geliştirilecek bilgisayar destekli bu sistemlerin maliyet açısından avantaj sağlayacağı, teşhis doğruluğunu ve hasta iyileşme sonuçlarını önemli ölçüde iyileştirdiği bildirilmektedir (Dinakarrao vd., 2019). Bu amaçla araştırmacılar EKG sinyallerinden otomatik aritmi tespiti için pek çok çalışma gerçekleştirmiştir (Wang vd., 2020; Ojha vd., 2022; Wan vd., 2024). Çalışmalar genel olarak iki aşamadan oluşmaktadır: öznitelik çıkarımı ve sınıflandırma. Öznitelik çıkarımı ve analiz uygulamalarında zaman analizi (Yeh vd., 2012), frekans analizi yöntemleri (Gupta ve Mittal, 2020; Mazaheri ve Khodadadi, 2020); morfolojik özellikler (Mazaheri ve Khodadadi, 2020; Yang ve Wei, 2020), istatistiksel özellikler (Mian Qaisar ve Hussain, 2023; Nascimento vd., 2020) kullanılmıştır. EKG sinyalleri durağan olmayan sinyaller olduğu için zaman-frekans analizi yöntemlerinden Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) (Daydulo vd., 2023), S dönüşümü (Das ve Ari, 2014; Mishra vd., 2021) veya Dalgacık Dönüşümü (Sharma vd., 2023; Allabun, 2024) yöntemleri kullanılarak da öznitelik çıkarımı gerçekleştirilmiştir.

Aritmi sınıflandırılmasında genel olarak Sinir Ağları (Mitra ve Samanta, 2013), Destek Vektör Makinesi (DVM) (Kohli ve Verma, 2011), Karar Ağacı (Sahoo vd., 2020), K-EnYakın Komşu (K-NN) ve Naive Bayes (Devadas, 2021) makine öğrenimi yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmaların birçoğu sınıflandırma aşamasında makine öğrenimi yaklaşımı kullansa da derin öğrenme ile aritminin tespiti ve otomatik sınıflandırması için de pek çok çalışma bulunmaktadır. Vasquez vd. (2024) gerçekleştirdikleri derleme çalışma da aritmi sınıflandırmasında kullanılan derin öğrenme çalışmalarına kapsamlı bir şekilde yer verilmiştir. Bilinen bir gerçek var ki derin öğrenme çalışmalarında her ne kadar öznitelik çıkarımı, seçimi yapılmadan sınıflandırma ham sinyallerden gerçekleştirilebilse de, derin öğrenme mimarilerinin oluşturulmasının zorluğu, hesaplama yükünün fazla olması, zaman alıcı olması ve donanımı iyi bilgisayarlar gerektirmesi nedeniyle dezavantaja sahiptir (Afaq ve Manocha, 2024). Aritmi sınıflandırmasında doğruluk oranı yüksek bazı çalışmalardan bahsetmek gerekirse: Sangaiah vd. (2020) kalp aritmilerinin hızlı tespitine yönelik Dalgacık (Wavelet) Dönüşümü (DD) tabanlı öznitelik çıkarımı ve gizli Markov modeli kullanarak sınıflandırma gerçekleştirmiştir. Model, MIT-BIH aritmi veri tabanından elde edilen Normal Sinüs Ritmi (NSR), Sağ Dal Bloğu (right bundle branch block/ RBBB), Sol Dal Bloğu (left bundle branch block/LBBB), Prematüre Ventriküler Kasılma (PVC) ve Atriyal Prematüre Kasılma (APC) aritmileri (5 sınıf) %99,7 doğruluk ile ayırt edebilmiştir. Yang ve Yan (2020), aynı veri setinde EKG aritmilerinin sınıflandırılması için çok boyutlu öznitelik çıkarma ve seçme yöntemi ortaya koymuştur. İlk olarak, görüntü şekil özniteliklerini çıkarmak için yeni çok aralıklı simetrik nokta deseni yöntemi önerilmiş ve bu öznitelikler zaman-frekans, morfolojik ve RR aralık öznitelikleriyle birleştirilerek yeni bir öznitelik seti oluşturulmuştur (toplam 316 öznitelik). Ardından, genetik algoritma (GA) ve DVM ile entegre edilen, ağırlık tabanlı ReliefF (WReliefF) yöntemi geliştirilmiş ve bu yöntem öznitelik seçimi için kullanılmıştır. Beş sınıflı sınıflandırma sonucu yöntem %99,42 duyarlılık, %99,83

özgüllük ve %99,74 doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Dhyani vd. (2023), EKG sinyallerini analiz etmek için 3 Boyutlu (B) Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) ve DVM yöntemlerini kullanmıştır. 3B dalgacık dönüşümü, sinyalden gürültünün giderilmesi ve öznitelik çıkarımı için kullanılmış, SVM ise EKG sinyallerini dokuz farklı kalp atım türüne sınıflandırmıştır. China Physiological Signal Challenge (CPSC) 2018 aritmi veri seti kullanılarak yapılan çalışmada, Symlet-8 (Sym8) filtresiyle seviyelendirilmiş 4. düzey yaklaşık katsayılarıyla en yüksek doğruluk oranı %99.02 olarak elde edilmiştir.

Literatür incelendiğinde aritminin otomatik tespiti için gerçekleştirilen çalışmaların çok olması, bu konunun kardiyovasküler hastalıkların erken teşhisi ve tedavisi için büyük önem taşıdığını göstermektedir. Çalışmaların çoğunda az aritmi türü ile çalışılmıştır. Ayrıca EKG'nin sadece genliğinde ve süresindeki değişiklikleri belirleyerek kardiyak anormalliği teşhis etmek ve analiz etmek doğrusal olmayan ve durağan olmayan sinyalde bulunan gizli bilgiyi çözmek açısından zordur ve gürbüz analiz sağlamamaktadır. Bu çalışmada, EKG sinyallerindeki 17 farklı kardiyak aktiviteyi otomatik olarak tanımlayan bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistem, zaman, frekans ve doğrusal olmayan analiz yöntemlerinden elde edilen özelliklerin birleştirilmesiyle aritmi tanısında bilgisayar tabanlı bir yaklaşım sunmayı ve önemli klinik bilgileri ortaya çıkarmayı hedeflemektedir. Bu amaçla, EKG sinyallerinden öznitelik çıkarımı ve ReliefF ile öznitelik seçimi işlemi gerçekleştirilerek farklı makine öğrenimi algoritmaları ile 17 farklı sınıfın sınıflandırma başarısı karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan EKG sinyalleri, PhysioNet (Goldberger vd., 2000) ve MIT-BIH Aritmi veri tabanından (Moody ve Mark, 2001) elde edilmiştir. Verilere açık erişimle "https://data.mendeley.com/datasets/7dybx7wyfn/3" bağıntısından ulaşılabilir (Plawiak, 2017). Veritabanı, 45 hastadan alınan EKG sinyallerini içermektedir. EKG sinyalleri, normal sinüs ritmi, pacemaker ritmi ve 15 farklı aritmi olmak üzere toplam 17 sınıftan oluşmaktadır ve her bir sınıf için en az 10 sinyal bulunmaktadır. EKG sinyalleri tek kanallı olarak Derivasyon-II'den 360 Hz. örnekleme frekansı ile örneklenerek elde edilmiştir. Analiz için, rastgele seçilen ve üst üste binmeyen, 10 saniyelik (3600 örnek) 1000 adet EKG sinyali kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan EKG ritimleri ve kalp rahatsızlıkları şu şekildedir: Normal Sinüs Ritmi (NSR- Normal Sinus Rhythm), kalbin normal bir sıklıkta döngüsel kasılmasıdır. Atriyal Prematüre Atım (APB- Atrial Premature Beat), atriyumda zamanından önce oluşan erken atımı belirtirken, Atriyal Flutter (AFL- Atrial Flutter) ise, atriyumda hızlı elektrik impulslarının etkisi ile ilişkili düzenli oluşan ritim bozukluğudur. Atriyal Fibrilasyon (AFIB- Atrial Fibrillation) ise düzensiz ve hızlı atriyum kasılmaları olarak tanımlanmaktadır. Supraventriküler Taşikardi (SVTA- Supraventricular Tachycardia) neredeyse her zaman kalbin üst bölgelerinde ortaya çıkan anormal hızlı aktivasyonu belirtirken, Wolff-Parkinson-White Sendromu (WPW – Wolff-Parkinson-White syndrome) ise kalp elektrik sinyallerinde, ek bir iletim yolunun bulunmasından kaynaklanmaktadır. Ventriküler Prematüre Atım (PVC- Premature Ventricular Contraction) ise ventriküllerde zamanından önce oluşan erken atımı belirtmektedir (Goldberger vd., 2017). Ventriküler Bigemini (Bigeminy) ve Ventriküler Trigemini (Trigeminy) ise her iki veya üç atımda bir erken ventriküler atımların olduğu ritim bozukluğu durumudur. Ventrikuler Taşikardi (VT- Ventricular Tachycardia) ise ventriküldeki kalp atışlarının sayıca çok olmasını ifade etmektedir. İdioventriküler Ritim (IVR – Idioventricular Rhythm) ventriküllerde yavaş ancak düzenli atım olarak tanımlanırken, Ventriküler Flatter (VFL -Ventricular Flutter) ise hızlı ve düzenli atımı belirtmektedir. Füzyon Atımları (Fusion Beats), normal ve anormal atımların bir arada olduğu ritim bozukluğudur. Sol Dal Bloğu (LBBB- Left Bundle Branch Block) ve Sağ Dal Bloğu (RBBB- Right Bundle Branch Block), kalbin elektrik sinyallerinin sol veya sağ dalda iletiminde blokaj olduğu durumlar iken Ani Dal Bloğu (SDHB- Sudden Bundle Branch Block) ani gelişen blokaj durumudur. Prematüre Ritim (PR- Premature Rhythm) ise kalbin erken atımlarını ifade etmektedir (Goldberger vd., 2017). Tablo 1'de çalışmada kullanılan 17 sınıf için EKG sinyali sayısı (veri sayısı) verilmiştir.

2.2. Önişleme

EKG sinyallerinin öncelikle kas hareketi gibi yüksek frekanslı bileşenlerden arındırılması için 4. Dereceden bant geçiren [1-100 Hz] Butterworth filtre ile gürültü eliminasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de NSR ve AF için ham ve filtrelenmiş sinyaller gösterilmektedir. Şekil 2'de ise çalışmada yer alan 17 farklı kalp ritmine ait 2 saniyelik filtrelenmiş EKG sinyalleri verilmiştir.

2.3. Öznitelik çıkarımı

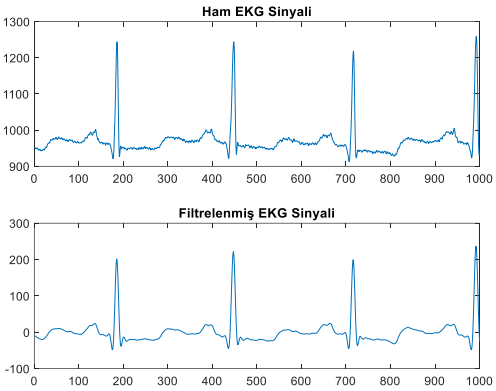
Öznitelik çıkarımı, ham verilerin çok boyutlu, karmaşık ve gürültülü olabilmesi nedeniyle veriden anlamlı bilgiler elde ederek, veriyi yorumlama ve makine öğrenimi modelleri ile doğruluğu yüksek sınıflandırma amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle öznitelik çıkarımı EEG veya EKG gibi fizyolojik sinyallerinden frekans ekseni, zaman ekseni veya istatistiksel özellikler çıkararak, modellerin karmaşık hastalıkları tanıması açısından önemlidir.

EKG sinyallerinden öznitelik çıkarımında yaygın olarak RR aralığı, QRS bileşik dalgası ve T dalgası sürelerine ek olarak, morfolojik özellikler zaman ekseninde elde edilen özellikler olarak kullanılmaktadır (Martis, Acharya ve Adeli, 2014; Mondéjar-Guerra, Novo, Rouco, Penedo ve Ortega, 2019). Zaman ekseninde öznitelik çıkarımı yapılması basit ve hızlıdır, ancak bu özellikler EKG sinyallerinin ince değişikliklerini ve gizli bilgilerini ortaya çıkarmakta yeterli değildir. Bazı istatistiksel

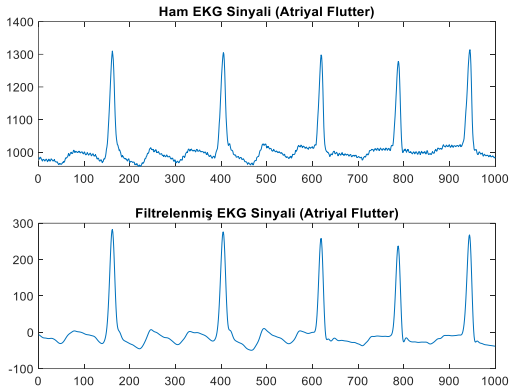
hesaplamalar ise EKG sinyallerinin daha yüksek dereceli kümülatif özelliklerini çıkararak gizli bilgi elde edebilmektedir (Martis vd., 2013). Öznitelik çıkarımında frekans ekseni analizi yöntemleri de kullanılmakla birlikte öznitelik çıkarımında yeni araştırmalarda gerçekleştirilmektedir (Marinho vd., 2019).

Tablo 1. 17 sınıf için veri sayısı

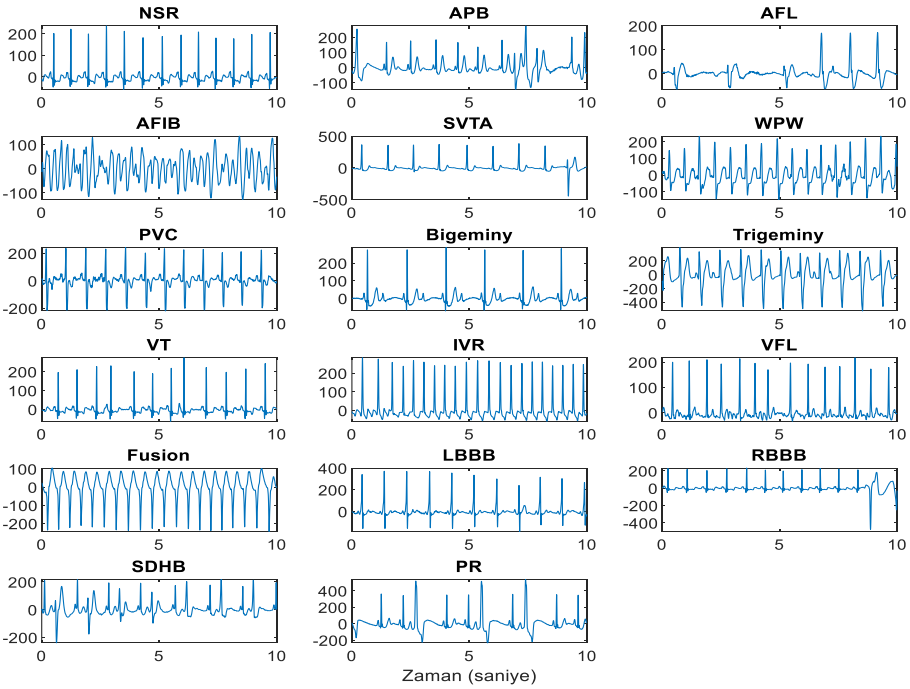
NSR	APB	AFL	AFIB	SVTA	WPW	PVC	Bigeminy	Trigeminy	VT	IVR	VFL	Fusion	LBBB	RBBB	SDHB	PR	Toplam
283	66	20	135	13	21	133	55	13	10	10	10	11	103	62	10	45	1000



Şekil 1. Önişlemden geçirilmiş EKG sinyalleri, normal sinüs ritmi.



Şekil 2. Önişlemden geçirilmiş EKG sinyalleri, atriyal flutter.



Şekil 3. 17 farklı kalp ritmine ait EKG sinyalleri.

Bu çalışmada, 17 farklı kalp ritmine ait EKG sinyallerinden anlamlı bilgi elde etmek için çeşitli öznitelikler çıkarılmıştır. R-R aralıklarından elde edilen öznitelikler kalp ritmi ve otonom sinir sistemi aktivitesini yansıtırken, QRS kompleksinden hesaplanan öznitelikler kalp atış hızını ve QRS genliklerinin istatistiksel özelliklerini içermektedir. Güç spektrumundan çıkarılan öznitelikler sinyalin frekans bileşenlerini ve enerjisini, filtrenmiş EKG sinyalinden elde edilen öznitelikler ise sinyalin genlik, entropi ve istatistiksel özelliklerini temsil etmektedir. Dalgacık dönüşümü ve DFA ile hesaplanan öznitelikler ise sinyalin frekans bantları ve kısa vadeli korelasyonlarını analiz etmektedir. Tablo 2'de çıkarılan öznitelikler kısaltmaları ve kategorilerine göre özetlenmiştir. Her EKG sinyali için 78 adet öznitelik elde edilmiştir

I. R-R aralıklarından hesaplanan öznitelikler: R-R aralıklarının varyansı ile kalp ritmindeki değişkenlik

(RR_variance), HRV (Heart Rate Variability)/Kalp Hızı Değişkenliği (KHD) otonom sinir sistemi aktivitesi hakkında bilgi vermektedir. RR_mean, R-R aralıklarının ortalamasıyla ortalama kalp atış hızını temsil eder. RMSSD (Root Mean Square of Successive Differences), ardışık R-R aralıklarındaki değişikliklerin kök ortalama karesi ile kısa vadeli HRV'yi ölçmektedir. NN50, ardışık RR aralıkları arasındaki sürenin 50 ms'den büyük olduğu çiftlerin sayısını gösterirken, pNN50, bu sayının toplam R-R aralıklarına oranını verir. HRV_Triangular_Index, KHD üçgen endeksi olarak, R-R histogramının taban genişliğinden türetilmektedir ve R-R histogramının taban genişliği ile toplam R-R aralıklarının oranıdır.

II. QRS kompleksinden hesaplanan öznitelikler: bpm (beats per minute), dakika başına düşen kalp atış sayısını (nabız), qrs_mean, qrs_var ve qrs_min ise sırasıyla QRS kompleksinin genliklerinin ortalamasını, varyansını ve minimum değerini göstermektedir. qrs_skewness ve qrs_kurtosis, ise QRS kompleksinin çarpıklığını ve basıklığını analiz etmektedir. Bu öznitelikler Pan-Tompkins algoritması ile tespit edilmiş QRS komplekslerine ait genlik değerlerinden hesaplanmıştır. Ayrıca bu yöntemdeki filtreleme işlemi olmadan ham QRS komplesine ait değerlerde hesaplanmıştır (raw olarak belirtilen öznitelikler).

III. Güç Spektral Yoğunluğu (GSY) grafiğinden hesaplanan öznitelikler: TotalP, sinyaldeki toplam gücü temsil ederken (GSY grafiğinin toplam alanı), relative_energy, güç spektrumunun göreceli enerjisini göstermektedir. spectral_entropy, frekans bileşenlerinin düzensizliğini ve sinyalin karmaşıklığına ait bilgi veren hesaplamadır. Şekil 3'te verilen GSY grafiğinde görüldüğü gibi Area1 (A) ve Area2 (B), güç spektrumundaki farklı alan değerleridir. peak_freq, en yüksek güç yoğunluğuna sahip frekansı, max_power ve min_power ise spektral güç yoğunluğunun maksimum ve minimum değerlerini göstermektedir. mean_power ve std_power, sırasıyla güç spektrumunun ortalamasını ve standart sapmasını verirken, kurtosis_psd ve skewness_psd, güç spektrumunun basıklığını ve çarpıklığının ölçüsüdür.

Tablo 2. Çıkarılan öznitelikler

Kategori	Öznitelik kısaltması	Adet
R-R Aralıklarından Hesaplanan Öznitelikler	RR_variance, HRV, RR_mean, RMSSD, NN50, pNN50, HRV_Triangular_Index	7
QRS Kompleksinden Hesaplanan Öznitelikler	bpm, qrs_mean, qrs_var, qrs_min, qrs_skewness, qrs_kurtosis, qrs_raw_mean, qrs_raw_var, qrs_raw_max, qrs_raw_min, qrs_raw_skewness, qrs_raw_kurtosis	12
GSY Grafiğinden Hesaplanan Öznitelikler	TotalP, relative_energy, spectral_entropy, Area1, Area2, peak_freq, max_power, min_power, diff_maxpower_minpower, mean_power, std_power, kurtosis_psd, skewness_psd	13
EKG Sinyalinden Çıkarılan Öznitelikler	ecg_mean, ecg_max, ecg_min, ecg_ShanEn, ecg_LogEnergyEn, ecg_ApEn, ecg_SampEn, ecg_skewness, ecg_kurtosis, ecg_onesec_ApEn, ecg_onesec_SampEn, ecg_onesec_ShanEn, ecg_onesec_LogEnergyEn, energy, power, activity, mobility, complexity, Alpha1	19
Dalgacık (Wavelet) Dönüşümüyle Hesaplanan Öznitelikler	LF_power, HF_power, LF_HF_ratio, D3_max, D3_min, D3_diff, D3_dist, D3_mean, D3_std, D3_skew, D3_rel_energy, D4_max, D4_min, D4_diff, D4_dist, D4_mean, D4_std, D4_skew, D4_rel_energy, D5_max, D5_min, D5_diff, D5_dist, D5_mean, D5_std, D5_skew, D5_rel_energy 27	27

I. Filtrelenmiş EKG sinyalinden çıkarılan öznitelikler: ecg_mean, EKG sinyalinin genliğinin ortalama değerini, ecg_max ve ecg_min ise sırasıyla maksimum ve minimum değerleridir. ecg_ShanEn, Shannon Entropisi ile sinyalin rastgeleliğini ölçerken, ecg_LogEnergyEn, sinyalin enerji temelli logaritmik entropisini analiz etmektedir. ecg_ApEn (Approximate Entropy), Yaklaşık Entropi algoritması ile sinyaldeki düzenlilik ve öngörülebilirliği, ecg_SampEn (Sample Entropy) Örnek Entropi algoritması ile sinyaldeki düzensizliği ölçmektedir. Entropi hesaplamaları her bir saniyelik veri için gerçekleştirilerek elde edilen sonucun ortalaması alınmıştır. Entropi algoritmaları için gereken gömülü boyut m=2, ve tolerans değeri r=2(*zaman serisinin standart sapması) olarak literatür incelemesi sonucu belirlenmiştir (Liou vd., 2022). Ayrıca, ecg_skewness ve ecg_kurtosis, sinyalin çarpıklığını ve basıklığını analiz ederken, energy ve power, EKG sinyalinin toplam enerjisi ve gücünü göstermektedir. Hjorth parametreleri aktivite, mobilite ve kompleksite (activity, mobility, ve complexity) ise sırasıyla bir sinyalin varyansını; mobilite, sinyalin zaman içindeki frekans bileşenlerinin yayılımını; kompleksite ise sinyalin şekil ve yapısındaki karmaşıklık düzeyini vermektedir.

II. Dalgacık dönüşümünden hesaplanan öznitelikler: Öncelikle EKG sinyali "Daubechies 4" ana dalgacık fonksiyonu kullanılarak 5 seviyeye ayrıştırılmıştır. Üçüncü, dördüncü ve 5. Seviyedeki detay katsayıları yeniden yapılandırıldıktan sonra bazı öznitelikler elde edilmiştir. LF_power ve HF_power, düşük ve yüksek frekans bandındaki gücü gösterirken, LF_HF_ratio, düşük frekans bandı gücünün yüksek frekans bandı gücüne

oranıdır ve otonom dengeyi ifade etmektedir. D3_max, D3_min, ve D3_diff, üçüncü seviyedeki dalgacık katsayılarının maksimum, minimum ve fark (maksimum-minimum) değerlerini temsil ederken, D4_max ve D5_max gibi öznitelikler de dördüncü ve beşinci seviyedeki dalgacık katsayılarına ait öznitelikleri vermektedir.

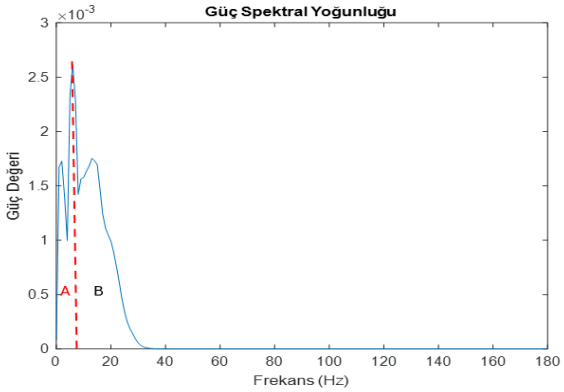
III. Eğilimsiz Dalgalanma Analizi/Detrended Fluctuation Analysis (DFA) yöntemiyle hesaplanan Alpha1 değeri, sinyalin kısa vadeli korelasyon özelliklerini ortaya koymaktadır. Bu yöntemi kısaca açıklamak gerekirse:

Eğilimsiz Dalgalanma Analizi 1995 yılında Peng vd. (Peng vd., 1995) tarafından önerilen durağan olmayan verilerin analizinde zaman dizilerindeki kısa ve uzun vadeli korelasyonları ve fraktal özellikleri incelemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Biyomedikal sinyallerde düzenlilik ve karmaşıklık analizinde tercih edilmektedir. Korelasyonlar, zaman serisinin fraktal öz-yakınlık boyutunun bir tahminini sağlayan bir ölçekleme üssü açısından ölçülmektedir. Bu yöntem için rasgele yürüyüşlü analitik yaklaşımda denilmektedir çünkü zaman dizisini kümülatif bir yürüyüşe dönüştürmektedir (Mizobuchi vd., 2021). Öncelikle, belirli bir zaman *serisi y(i), i = 1,2,3 . . . , N* adet örneğe sahip ve örnekleme periyodu *fs* için DFA yöntemi, zaman dizisini eşit büyüklükteki n adet pencereye böler; bu τ = n*fs zaman ölçeğine karşılık gelmektedir (eşitlik 1).

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Y(i) - Y_n(i))^2} \qquad (1)$$

Ardından belirlenen pencere boyutuna göre verileri uydurmak için doğrusal bir fonksiyon kullanır ve dalgalanmalara ait trend çıkarılır. Pencerelere ayrılmış verinin dalgalanma büyüklüğü hesaplanır ve pencere boyutuna karşı log-log ölçeğinde grafiği çizilmektedir. Elde edilen grafiğin eğimi Alfa değeridir ve sinyalin fraktal özellikleri hakkında bilgi verir. Alfa1 değeri kısa süreli korelasyonlar, alfa2 değeri ise uzun süreli korelasyonlar hakkında bilgi vermektedir (Mizobuchi vd., 2021). Bu çalışmadaki sinyaller 10 saniyelik olduğu için alfa1 değeri incelenmiştir. Alfa değeri α= 0,5 ise bu sinyalin beyaz gürültü olduğu anlamına gelir. Öte yandan, α < 0,5 ise sinyaldeki korelasyonlar anti-kalıcıdır (yani bir artışın ardından bir azalma gelmesi çok olasıdır ve bunun tersi de geçerlidir) ve α > 0,5 ise sinyaldeki korelasyonlar kalıcıdır (yani bir artışın ardından bir artış gelmesi çok olasıdır ve bunun tersi de geçerlidir) (Rodriguez, Lerma, Echeverria ve Alvarez-Ramirez, 2008). Bu nedenle α<0,5 ise sinyallerdeki düzensizliğin daha fazla olduğu, α>0,5 ise sinyallerin daha düzenli bir örüntüye sahip olduğu bilgisine ulaşılmaktadır.

Eşitlik 1'de verilen F(n), belirli pencere boyutundaki dalgalanma fonksiyonunu, Y(i) zaman dizisini, $Y_n(i)$ trend çıkarılmış diziyi ifade etmektedir. Şekil 4'te NSR'e ait EKG sinyali için pencere boyutu 100'der adım değiştirilerek elde edilmiş log-log trend grafiği ve hesaplanan alfa değeri verilmiştir.



Şekil 4. NSR için GSY.

Aritmi tespiti çalışmaların büyük bir kısmı, genellikle yalnızca zaman analizi üzerine odaklanmıştır; bunu takiben frekans analizi yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise hem zaman hem de frekans eksenindeki analizler bir araya getirilerek, entropi ve karmaşıklık tabanlı yaklaşımlarla desteklenen hibrit bir yöntem geliştirilmiştir. Böylece, otomatik aritmi tespitinde daha kapsamlı ve etkili bir model sunulmuştur.

2.4. ReliefF ile Öznitelik Seçimi

Öznitelik seçimi yöntemleri Filtreleme, Sarmalayıcı (wrapper) ve hibrit yöntemler olmak üzere üç ana kısma ayrılmaktadır. ReliefF yöntemi, Kira ve Rendell (Kira ve Rendell, 1992) tarafından iki sınıflı veriler için; Kononenko (Kononenko, 1994) tarafından ise çok sınıflı veriler ve eksik değerler içeren veri kümelerinde öznitelik seçimi yapmak için geliştirilmiş bir filtre tabanlı öznitelik seçimi yöntemidir. ReliefF yöntemi, her bir özniteliğin sınıflar arasındaki ayırt etme yeteneğini ölçerek özniteliklerin ağırlığını hesaplamaktadır. Bu işlemi verilerin sınıf içi en yakın komşuları ve sınıf dışı en yakın komşuları arasındaki uzaklığın analizine dayalı gerçekleştirmektedir. Özniteliklerin ağırlığı Denklem (2)'deki gibi hesaplanmaktadır ve hesaplama sırasında gerçekleştirilen işlemler şu şekildedir: İlk olarak, eğitim setinden rastgele bir R örneği seçilir ve R'nin ait olduğu sınıftan en yakın komşu örneği Y seçilir. Ardından, diğer sınıflardan en yakın komşu örneği U seçilir. Eğer R ve Y arasındaki mesafe, R ve U arasındaki mesafeden küçükse, bu durum bu özniteliğin sınıflandırma için uygun olduğunu gösterir ve bu özniteliğin ağırlığı artırılmalıdır; tersine, eğer mesafe büyükse, bu özniteliğin sınıflandırma için uygun olmadığını gösterir ve ağırlığı azaltılmalıdır. Bu süreç, bütün özniteliklerin ağırlığı elde edilene kadar tekrarlanmaktadır (Yang ve Yan, 2020). Eşitlik 2'de $W(F_i)$ F_i özniteliğinin ağırlığını, $dist(F_i, R, Y)$ F_i özniteliği için R ile komşu Y arasındaki uzaklık, P(a) a sınıfının olasılığı, m ise tekrarlama sayısı (örnek sayısını) temsil etmektedir.

$$W(F_i) = W(F_i) - \frac{dist(F_i,R,Y)}{m} + \sum_{a \neq sınıf(R)} \frac{P(a)}{1 - P(sınıf(R))} \cdot \frac{dist(F_i,R,U)}{m} \quad (2)$$

Öznitelik seçimi süreci, veri boyutunu azaltarak hesaplama yükünü, süresini kısaltmakta ve modelin performansını iyileştirmektedir. Bu çalışmada basit, etkili ve daha az hesaplama karmaşıklığı olması nedeniyle ReliefF yöntemi tercih edilmiştir (Huang vd., 2018). Deneysel olarak öznitelik seçiminde LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) ve Kruskal-Wallis yaklaşımları da denenmiş fakat ReliefF yönteminden daha kötü sonuç verdikleri için çalışmaya eklenmemiştir.

2.5. Makine Öğrenimi

Bu çalışmada seçilen özniteliklerin sınıflandırılmasında RO, DVM, K-NN ve DA algoritmaları kullanılmıştır. RO, Leo Breiman (Breiman, 2001) tarafından geliştirilen hızlı ve gürültüye dayanıklı bir sınıflandırma yöntemidir. Bu yöntem, makine öğrenmesinde özniteliklerin rastgele seçildiği topluluk tabanlı bir yaklaşımdır. Her bir karar ağacı, rastgele seçilen bir öznitelik alt kümesi kullanarak bağımsız bir sınıflandırma yapar ve bu sınıflar için oy verir. Birden fazla ağaç kullanılması, tek bir ağacın çıktısına göre daha az gürültü ve aykırılık sağlar, bu da tahminlerin sağlamlığını artırır ve değişkenliği azaltır. Bu nedenle, özellikle tıbbi veri setlerinde tercih edilmektedir (Altıntop vd., 2022). DVM, doğrusal olmayan verileri etkili bir şekilde sınıflandırmak için kullanılan güçlü bir yöntemdir. DVM, sınıflar arasındaki ayrım mesafesini maksimize eden karar hiperdüzlemleri oluşturmayı hedefler. Eğer veriler doğrusal olarak ayrılamıyorsa, DVM, verileri daha yüksek boyutlu bir uzaya haritalar ve burada optimal bir sınıflandırma hiperdüzlemi bulur (Cortes ve Vapnik, 1995). Kullanılan çekirdek fonksiyonu, verileri daha yüksek boyutlara taşımak ve sınıflandırma doğruluğunu artırmak için kritik öneme sahiptir. Polinom, Gauss radyal tabanlı ve Sigmoid çekirdek fonksiyonları en yaygın olanlarıdır. K-NN, sınıflandırma ve regresyon için kullanılan parametrik olmayan bir öğrenme yöntemidir. Bu algoritma, yeni bir örneği sınıflandırmak için mevcut örnekler arasındaki en yakın K komşuyu dikkate alır. K değeri seçildiğinde, hedef noktaya en yakın komşuların sınıfları arasında çoğunluk oyu alınarak sınıflandırma yapılır. Örneğin, K=1 olduğunda, örnek en yakın komşusunun sınıfına atanır. Bu yöntem, tembel öğrenme olarak adlandırılan bir yaklaşımı benimser ve tüm hesaplamaları sınıflandırma aşamasında gerçekleştirir (Gou vd., 2019). Diskriminant Analizi, iki veya daha fazla sınıfı ayırt etmek için geliştirilmiş istatistiksel bir yöntemdir. Amaç, farklı sınıflar arasında maksimum ayrım sağlayacak bir karar sınırı oluşturmaktır. Bu yöntem, verileri ayıran doğrusal bir hiperdüzlem tanımlayarak çalışır. Diskriminant fonksiyonu, sınıflar arasındaki değişkenliği artırırken, aynı zamanda her bir sınıf içindeki değişkenliği azaltmaya çalışır. Genellikle doğrusal olarak ayrılabilen verilerde yüksek bir başarı sağlar ve sınıflandırma, modelleme ve özellik seçimi gibi uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Bishop ve Nasrabadi, 2006).

Sınıflandırma işlemi, 5-fold çapraz doğrulama ve 10-fold çapraz doğrulama ile gerçekleştirilmiştir. 10-fold çapraz doğrulama için veri seti 10 eşit parçaya bölünür ve her seferinde bir parça test verisi olarak kullanılırken, kalan 9 parça modelin eğitimi için kullanılmaktadır. Bu işlem, tüm veri seti için tekrarlandığından, her bir veri örneği bir kez test verisi olarak kullanılmış olmaktadır. Sonuç olarak, model performansı 10 defa gerçekleştirilen test sonuçlarının ortalaması alınarak hesaplanmaktadır. Modellerin hiper-parametreleri Bayes optimizasyonu kullanılarak otomatik olarak belirlenmiştir.

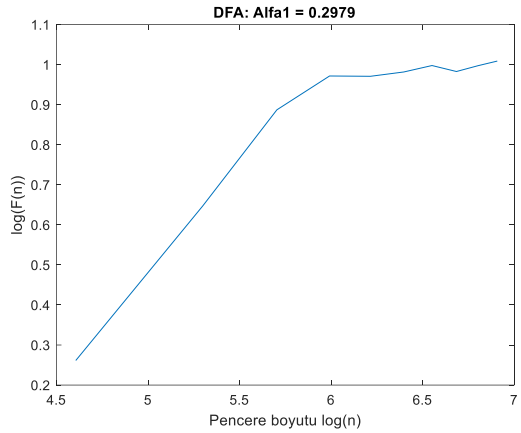
3. Bulgular

Bu bölümün alt başlıklarında öznitelik seçimi sonuçları ve makine öğrenimi algoritmaları ile sınıflandırma sonucu verilmiştir.

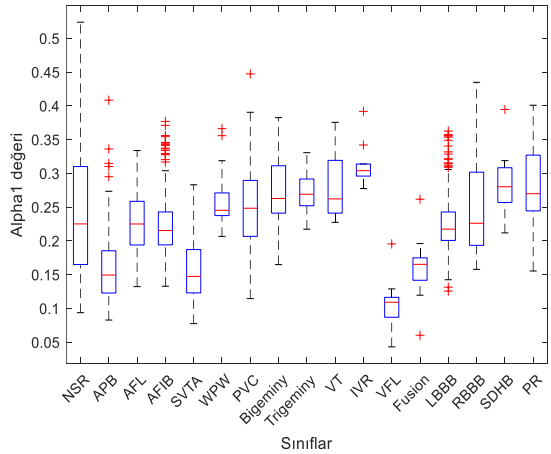
3.1. ReliefF ile Öznitelik Seçimi Sonuçları

ReliefF ile öznitelik seçiminde literatürde çok kullanılması nedeni ile K=10 en yakın komşuya bakılarak işlem gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te EKG sinyallerinden çıkarılan toplam 78 adet özniteliğin ağırlıkları gösterilmiştir. Sınıflandırma işlemi için özniteliklerin seçiminde ağırlık değerlerine göre öznitelikler seçilerek iteratif olarak makine öğrenimi algoritmalarının eğitiminde kullanılmıştır. Şekil 6'de ise RO algoritması ile en yüksek doğruluk (accuracy) değerinin elde edildiği 41 adet özniteliğin ismi ve ağırlık bilgileri gösterilmiştir. Buna göre ReliefF ile öznitelik önem sırasında ilk olarak GSY grafiğinden elde edilen maksimum gücü veren frekans değeri (peak_freq), ikinci olarak DD analizi sonucu 3.seviye detay katsayına ait çarpıklık değerleri (D3_skew), üçüncü olarak DFA yöntemi sonucu elde edilen alfa1 değeri (Alpha1) olduğu görülmektedir. Bu üç özniteliğin önem ağırlığı birbirine yakındır. Öznitelik seçiminde ReliefF yönteminin kullanılması ile normal sinüs ritmi, pacemaker ritmi ve 15 farklı aritmi olmak üzere toplam 17 sınıfı birbirinden ayırmada özniteliklerin ne derece başarılı olabileceği görülmüştür.

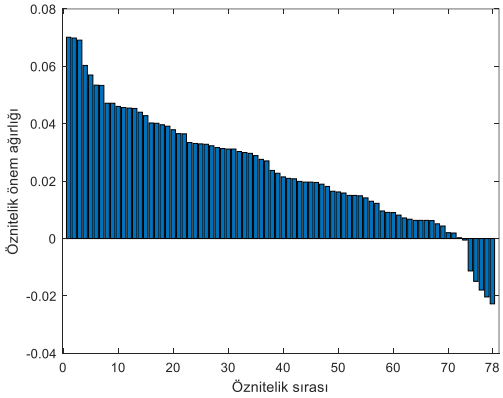
DFA ile elde edilen Alfa değerlerinin gruplar arasındaki ilişkisini incelemek için kutu-grafiğini (Şekil 7) olarak gözlemlemek gerekirse; genel olarak, kutu-grafiğindeki alfa değerleri sınıflar arasında belirgin farklılıklar göstermektedir. SVTA, APB, Fusion ve VT gibi ritim bozuklukları daha düşük alfa değerlerine sahipken, NSR, RBBB, LBBB, PVC ve WPW gibi sınıflar daha geniş dağılımlar ve daha yüksek alfa değerleri ile dikkat çekmektedir. Bu durum, bazı patolojik durumlarda sinyallerin daha düzenli ve tahmin edilebilir olduğunu, diğerlerinde ise sinyallerin karmaşıklığının arttığını işaret etmektedir. Özellikle AFIB ve LBBB gibi bozukluklar geniş bir alfa dağılımı göstererek, sinyalin hem düzenli hem de düzensiz dönemler sergileyebileceğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bu alfa değerleri sinyallerin farklı ritim ve karmaşıklık özelliklerini yansıtarak DFA analizi kullanılarak sınıfların birbirinden ayırt edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 5. NSR için DFA eğrisi



Şekil 6. Kalp rahatsızlıklarının DFA analizi sonucu alfa değerlerinin çizimi



Şekil 7. Relieff sonucu tüm özniteliklerin önem ağırlığı

3.2. Sınıflandırma Sonucu

Bu çalışmada sınıflandırma aşamasında farklı metodolojilere sahip algoritmaların çıkarılan ve seçilen özniteliklerden 17 sınıfı ne kadar öğrenebildiği ve sınıflandırabildiğini karşılaştırabilmek için RO, K-NN, DVM ve DA algoritmaları kullanılmıştır. Verilerin eğitim ve test sürecinde 5-fold ve 10-fold çapraz doğrulama kullanılmıştır. Bazı sınıflarda veri sayısının az olması durumundan dolayı bu örneklerin hiç eğitime dahil olamayacağı endişesinden veri 10 eşit parçaya ayrılırken (10-fold için) her sınıftan verinin olması sağlanmıştır. Ayrıca en yüksek örnek sayısına sahip 283 örnek ile NSR iken, VT, IVR, VFL, SDHB ise 10 örnekle en az sayıda EKG sinyali içeren gruplardır. Veri setinde sınıflar arasındaki dengesizlik, sınıflandırma çalışmalarında istenmeyen bir durum olup, doğru sonuçlar elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Özellikle azınlık (minority) ve çoğunluk (majority) sınıfları arasındaki bu dengesizlik, sınıflandırma performansını olumsuz etkileyerek yanıltıcı sonuçlara yol açabilmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için veri sayısını dengeli yapabilmek amacıyla bu çalışmada Sentetik Azınlık Aşırı Örnekleme Yöntemi (Synthetic Minority Oversampling Technique-SMOTE) algoritması kullanılmıştır. SMOTE algoritması, azınlık sınıfındaki örneklerin özellik uzayındaki en yakın komşularını (bu komşular rastgele seçilir) temel alarak, benzer özelliklere sahip sentetik veriler oluşturmaktadır (Chawla vd., 2002). Bu çalışmada K=5 en yakın örneğe bakılarak sentetik veriler oluşturulmuş ve 17 sınıfın hepsinde 283 adet örnek (toplam 4811 örnek) elde edilmiştir. Tablo 3'te öznitelik seçimi sırasında en yüksek doğruluk değerinin elde edildiği öznitelik sayısı algoritmalara göre verilmiştir.

ReliefF algoritması ile öznitelik seçiminde sınıflandırma algoritmalarının farklı performans sergilediği ve SMOTE yöntemi ile dengelenmiş verinin sınıflandırılmasında öznitelik sayısının LDA algoritması hariç artırdığı görülmektedir. LDA algoritması dengesiz veri için en fazla özniteliği seçerken, K-NN ve DVM algoritmaları ile sınıflandırmada daha az sayıda öznitelik seçilmiştir. SMOTE kullanımı, genel olarak tüm algoritmalarda seçilen öznitelik sayısında artışa yol açmıştır. Sınıflandırma sonuçları her fold'un doğruluğunun ortalama±standart sapma değerleri ile dengeli ve dengesiz veri için ayrı verilmiştir. Bu çalışmada sınıflandırma metriği olarak sadece doğruluk değeri verilmiştir. Çünkü 17 sınıf olduğu için hassasiyet (sensitivity), özgüllük (specificity) gibi ölçümlerin her sınıf için ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu da çalışmada karmaşıklık oluşturabilecek bir durumdur ve anlamlı bilgi içermeyecektir.

Tablo 4, dört farklı sınıflandırma algoritmalarının 5-fold ve 10-fold çapraz doğrulama ile modelin eğitimi ve test süreci sonrası doğruluk sonuçlarını karşılaştırmaktadır. DVM algoritması, 5-fold çapraz doğrulamada %90,70 doğruluk ile düşük bir standart sapma (%1,2) göstermektedir. 10-fold çapraz doğrulamada doğruluk oranı %91,90'a çıkarak daha yüksek bir performans sunmakta, ancak standart sapma %3,07 ile biraz artmaktadır. K-NN algoritması, her iki çapraz doğrulama yönteminde de en yüksek doğruluk oranlarına sahip olup, 5-fold'ta %92,90, 10-fold'ta ise %93,40 doğruluk sağlamaktadır. Aynı zamanda düşük standart sapma değerleri (%1,78 ve %1,96) ile istikrarlı bir performans sergilemektedir. LDA algoritması ise en düşük doğruluk oranlarını göstermekte; hem 5-fold hem de 10-fold çapraz doğrulama sonuçlarında %87.80 doğruluğa sahiptir ve standart sapma oranları nispeten düşük kalmaktadır (%1,75 ve %2,49). Son olarak, RO

algoritması da yüksek doğruluk oranlarına sahiptir; 5-fold çapraz doğrulamada %92,90, 10-fold çapraz doğrulamada ise %93,10 doğruluk göstermekte olup, oldukça düşük standart sapma oranları (%0,74 ve %1,68) ile en tutarlı sonuçları sunmaktadır. Genel olarak, K-NN ve RO algoritmaları en yüksek doğruluk oranlarına ve tutarlılığa sahipken, LDA en düşük doğruluk oranını göstermiştir. Genel olarak sınıflandırma başarısı 10-fold çapraz doğrulama için başarılı olmasından ve 5-fold ile yakın sonuçlar vermesinden dolayı Tablo 5'te SMOTE ile dengelenmiş veri için sınıflandırma sonuçları verilmektedir.

Tablo 5 ve Şekil 8 incelenirse; RO algoritması dengelenmiş veri için %99,23 ile en yüksek doğruluk değerine sahip olup, aynı zamanda düşük bir standart sapma (%0,38) göstererek en tutarlı ve güvenilir performansı sağlamaktadır. K-NN algoritması ise %98.48 doğruluk ile ikinci sırada yer almakta ve yine düşük bir standart sapma (%0,42) ile nispeten istikrarlı sonuçlar sunmaktadır. LDA algoritması, %97,40 doğruluk ile en düşük performansı göstermektedir ve bu algoritmanın standart sapması diğerlerine göre daha yüksektir (%0,95), bu da daha değişken bir performansa işaret etmektedir. DVM algoritması ise %97,86 doğruluk ile LDA'dan daha iyi, ancak RO ve K-NN'den daha düşük performans göstermekte olup, düşük standart sapma (%0,40) değeri ile istikrarlı bir sonuç sunmaktadır. Genel olarak, RO algoritması en yüksek doğruluğu ve tutarlılığı sergilerken, LDA algoritması en düşük doğruluk ve en yüksek değişkenliği göstermiştir.

Şekil 9 ve Şekil 10'da RO, K-NN algoritmalarının 10-fold çapraz doğrulama kullanılarak öznitelik sayısının ReliefF yöntemi ile belirlenen ağırlık değerlerine göre sırasıyla seçilmesiyle elde edilen doğruluk değerleri ve en yüksek doğruluk değerine sahip modelin karmaşıklık matrisi gösterilmiştir. Algoritmaların Bayes optimizasyonu sonucu elde edilen hiper-parametreleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 3. ReliefF ile seçilen öznitelik sayısı

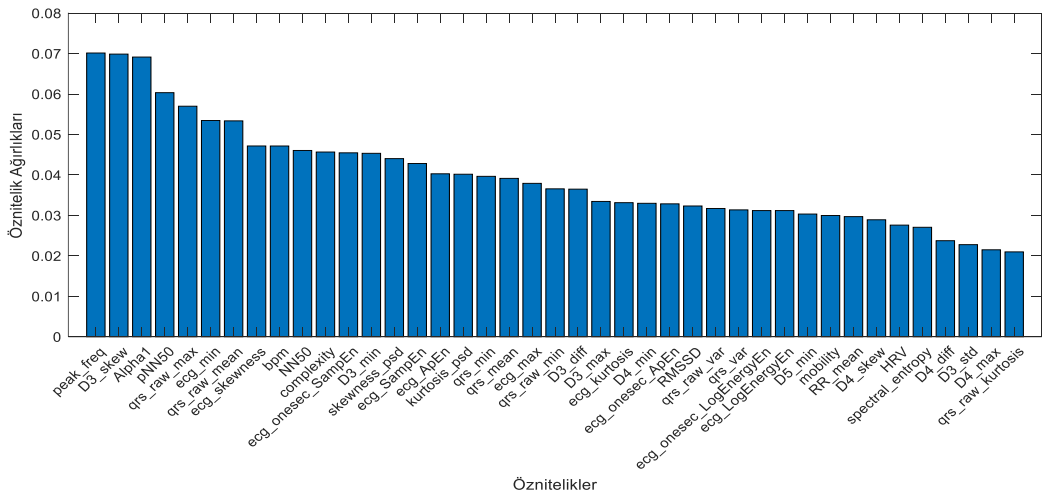
Algoritma	Dengesiz veri 5-fold	Dengesiz veri 10-fold	SMOTE ile Dengelenmiş veri (10-fold)
RO	48	41	63
K-NN	27	24	52
DVM	37	40	52
LDA	69	72	30

Tablo 4. Dengesiz veri ile sınıflandırma sonuçları

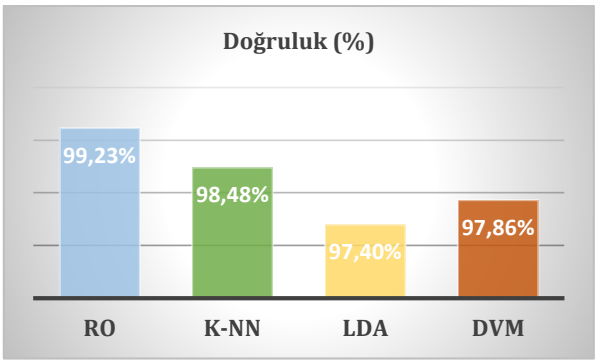
Algoritma	5-fold çapraz doğrulama (Doğruluk Değeri) μ±σ	10-fold çapraz doğrulama (Doğruluk Değeri) μ±σ
DVM	0,9070±0,0120	0,9190±0,0307
K-NN	0,9290±0,0178	0,9340±0,0196
LDA	0,8780±0,0175	0,8780±0,0249
RO	0,9290±0,0074	0,9310±0,0168

Tablo 5. Dengeli verinin sınıflandırılması sonucu

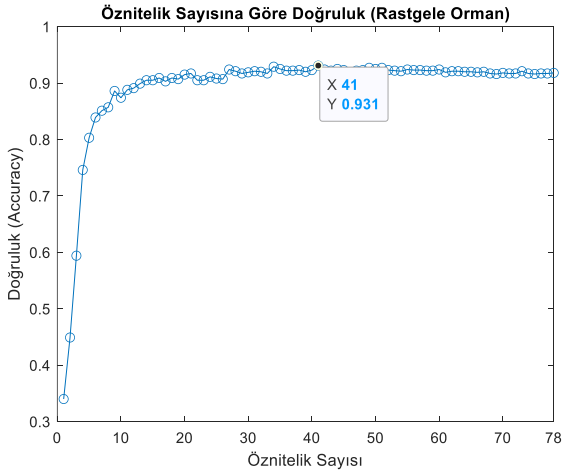
Doğruluk değeri 10-fold için	RO	K-NN	LDA	DVM
Ortalama	0,9923	0,9848	0,9740	0,9786
Standart sapma	0,0038	0,0042	0,0095	0,0040



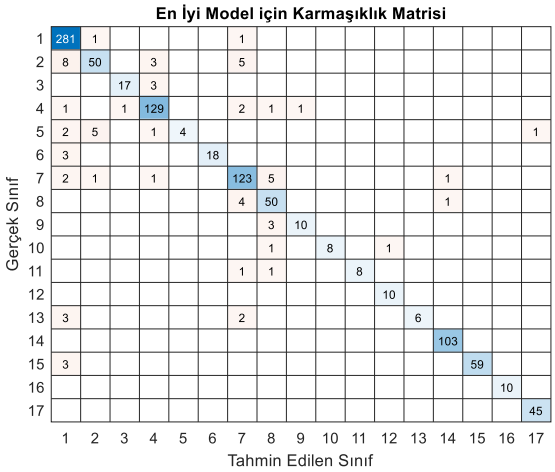
Şekil 8. En yüksek doğruluğun elde edildiği öznitelikler (41 öznitelik).



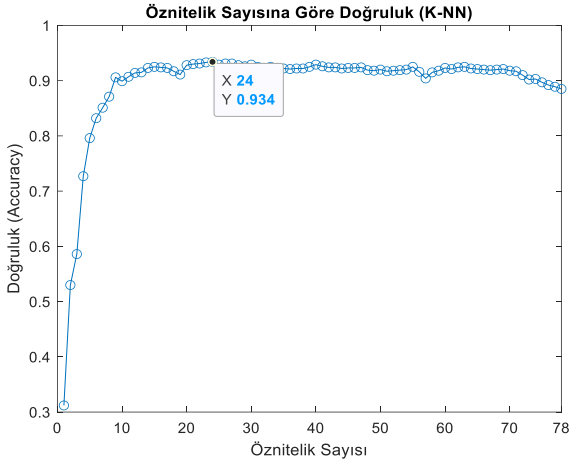
Şekil 9. SMOTE ile dengelenmiş verinin sınıflandırma sonucu



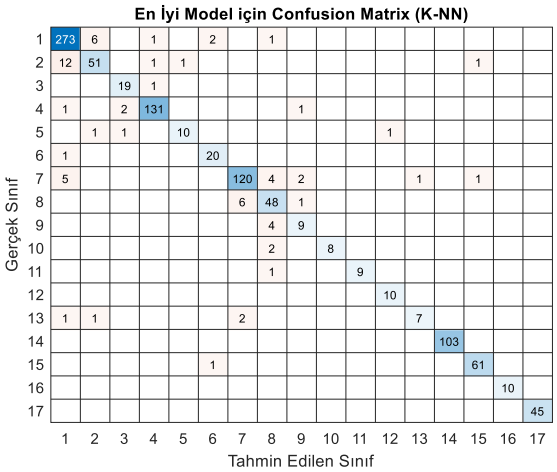
Şekil 10. Dengesiz veri için RO algoritması sonuçları; Öznitelik sayısına göre doğruluk grafiği.



Şekil 11. Dengesiz veri için RO algoritması sonuçları; En yüksek doğruluk değeri için karmaşıklık matrisi.



Şekil 12. Dengesiz veri için K-NN algoritması sonuçları; Öznitelik sayısına göre doğruluk grafiği.



Şekil 13. Dengesiz veri için K-NN algoritması sonuçları; En yüksek doğruluk değeri için karmaşıklık matrisi.

Tablo 6. En yüksek doğruluğu veren modele ait optimizasyon ile belirlenen parametreler

Model	5-fold	10-fold	SMOTE ile 10-fold
DVM	BoxConstraint= 0.1067 Kernelfunction= 'polynomial'	BoxConstraint=0.0956 Kernelfunction= 'polynomial'	BoxConstraint= 0.6589 Kernelfunction= 'polynomial'
K-NN	NumNeighbors=1 Distance= 'euclidean' NSMethod= 'exhaustive'	NumNeighbors=1 Distance= 'euclidean' NSMethod= 'exhaustive'	NumNeighbors=1 Distance= 'euclidean' NSMethod= 'exhaustive'
LDA	DiscrimType= "linear" Gamma=4.1295e-04 Delta=0.003	DiscrimType= "linear" Gamma= 0.0025 Delta=2.1447e-05	DiscrimType= "pseudoQuadratic" Gamma=0 Delta=0
RO	Ağaç sayısı:500	Ağaç sayısı:500	Ağaç sayısı:100

4. Tartışma

Kalp anomalisi EKG dalgası kullanılarak teşhis edilebilmektedir. Ancak, EKG dalgalarının genlik ve frekans bileşenlerinin, manuel yöntem kullanan bir klinisyen için doğru ve tutarlı bir şekilde tespit edilmesi çok incelikli ve hata yapılması ihtimali yüksek bir durumdur. Bu nedenle, EKG sinyalinin incelenmesinde bilgisayar destekli yaklaşım kullanılması, klinisyenlerin kardiyovasküler hastalıkları önemli ölçüde yönetmesine yardımcı olacaktır. Bu amaçla birçok çalışma gerçekleştirilmiştir:

Osowski ve Linh (2001), hibrit bulanık sinir ağı kullanarak yedi EKG sınıfını (normal, LBBB, RBBB, APC, PVC, VFL ve ventriküler kaçış atımı) ayırt etmek için yüksek dereceli istatistik özelliklerini kullandılar ve %96,06'lık doğruluk ile 7 sınıfı sınıflandırabildiler. Sınıflandırıcının eğitimi ve testi için sırasıyla 4035 ve 3150 atım kullandılar (toplamda 7185 atım). İnan vd. (2006) PVC, normal ve diğer atımları %95,16 doğrulukla sınıflandırmak için sinir ağı tabanlı bir sınıflandırıcı ve zaman özellikleri, DD özellikleri kullanmıştır. Normal, PVC ve diğer sınıfları içeren MIT-BIH aritmi veritabanının 40 dosyasından 93.281 EKG atımı kullanmışlardır. Normal atımlar sırasıyla %98,33 ve %97,58 duyarlılık ve pozitif tahmin değeri ile sınıflandırılmıştır. Benzer şekilde, PVC atımları sırasıyla %82,57 ve %93,42 duyarlılık ve pozitif tahmin değeri ile sınıflandırılmıştır. Oh vd. (2019) ise 5 farklı aritminin (NSR, APB, PVC, LBBB ve RBBB) sınıflandırılmasında toplam 94667 EKG atımını değiştirilmiş U-Net mimarisi kullanmıştır. Model, 10 katlı çapraz doğrulama ile %97.32 sınıflandırma doğruluğu ve %99,3 R tepe noktası tespit doğruluğu sağlamıştır. Shi vd. (2019)'nin çalışmasında, EKG kalp atışlarının sınıflandırılması için ağırlıklı extreme gradient boosting (XGBoost) tabanlı hiyerarşik yöntem önerilmiştir. Çalışmada 168 özellik çıkarılmış ve recursive feature elimination (RFE) yöntemiyle özellik seçimi yapılmıştır. İki katmanlı hiyerarşik sınıflandırıcıda, ilk katmanda XGBoost ile kalp atışları normal (N), supraventriküler (S), ventriküler (V), füzyon (F) ve bilinmeyen (Q) sınıflarına ayrılmış, ikinci katmanda ise ek bir eşik sınıflandırıcı ve XGBoost ile daha ayrıntılı sınıflandırma yapılmıştır. N,S,V,F sınıflarında duyarlılıklar sırasıyla %92,1, %91,7, %95,1 ve %61,6 olarak elde edilmiştir. Çalışmada toplam 10630 atım kullanılmıştır ve tekli kalp atışlarını sınıflandırmada XGBoost'un ilk kez kullanıldığını belirtmişlerdir. Daha fazla çalışma için aritminin otomatik tespitine dair yakın zamana ait (Ebrahimi vd., 2020; Singhal ve Kumar, 2023) derleme çalışmaları incelenebilir.

Bu çalışmalarda her bir nabız atımı ayrı değerlendirilmiştir, veri sayısı oldukça yüksektir ve sınıflandırılan aritmi sayısı genellikle 5 ile sınırlıdır. Bu çalışmada ise kısa süreli (10 saniye) EKG sinyallerinden zaman, frekans, zaman-frekans, entropi ve karmaşıklık öznitelikleri çıkarılarak öznitelik seçimi gerçekleştirilmiş ve çeşitli sınıflandırıcılarla az sayıda veriden aritmilerin sınıflandırılması yüksek doğrulukla sağlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan veri setinin ilk kullanıldığı ve 17 sınıflı sınıflandırmanın gerçekleştirdiği çalışma Plawiak (2018) tarafından sinyallerin GSY'dan frekans değerlerinin öznitelik olarak çıkarıldığı ve Genetik Algoritma ile seçilen özniteliklerin Olasılıksal Sinir Ağı, DVM, K-NN, Radyal Baz Fonksiyonlu Sinir Ağı yöntemleri kullanılarak sınıflandırılmasını içeren yeni bir yaklaşımdır. Çalışmada 4-fold ve 10-fold çapraz doğrulama sonuçlarına yer verilmiş ve 10-fold ile SVM algoritması %90,2 doğruluk elde edilmiştir. Tuncer vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, ADD ve yeni bir yöntem olan 1-boyutlu hekzadesimal yerel desen (1D-HLP) tekniği birleştirilmiştir. 10 saniyelik EKG sinyalleri, ADD ile beş seviyeye kadar ayrıştırılmış ve her seviyeden 1D-HLP yöntemiyle 3072 boyutlu özellikler çıkarılmıştır. Bu özellikler birleştirilerek büyük bir özellik seti oluşturulmuş ve ardından mahalle bileşeni analizi (NCA) ile 64, 128 ve 256 özellik olacak şekilde boyut indirgeme uygulanmıştır. Elde edilen bu özellikler, 1 en yakın komşu (1NN) sınıflandırıcısına dört farklı uzaklık metriği (city block, Euclidean, Spearman, ve cosine) ile uygulanmış ve 17 aritmi sınıfını %95 doğrulukla sınıflandırmayı başarmışlardır. Bu çalışmada öncelikle 3072 öznitelik elde edilmiş ve 256 adeti seçilmiştir. Çalışılan öznitelik sayısı gerçekleştirilen bu çalışma ile karşılaştırıldığında oldukça fazladır bu durum sınıflandırıcının eğitim süresini arttıracaktır. Plawiak ve Pławiak ve Acharya, (2020), 17 aritmi sınıfının tespiti için yenilikçi bir üç katmanlı derin genetik sınıflandırıcılar topluluğu (DGEC) geliştirilmiştir. Bu yöntem, topluluk öğrenimi, derin öğrenme ve evrimsel hesaplamayı bir araya getiren hibrit bir yaklaşımdır.

Çalışmada, Welch yöntemi ve ayrık Fourier dönüşümü ile spektral güç yoğunluğu tahmin edilerek öznitelikler güçlendirilmiştir. Genetik algoritma ile öznitelik seçimi ve sınıflandırıcı parametrelerinin genetik optimizasyonu ile geliştirilen DGEC sistemi, %94.62 doğruluk ile 17 sınıfı sınıflandırmıştır. Fakat çalışmalarının daha uzun sistem tasarımı, daha uzun eğitim ve optimizasyon gerektiren karmaşık yapıya sahip olmasının dezavantaj olduğunu belirtmişlerdir. Alqudah ve Alqudah (2022) çalışmasında, EKG sinyalleri üzerinde vuruş bazlı analiz yapılarak 17 sınıfa kadar kalp aritmilerini tespit etmek için yeni bir derin öğrenme metodolojisi sunulmuştur. Yöntem, her bir EKG vuruşunu analiz ederek iris spektrogramı hesaplamakta ve bu spektrogramı bir evrişimli sinir ağına (CNN) beslemektedir. Çalışma, 17 aritmi sınıfında sırasıyla %97.494 ± %1.26 doğruluk oranına ulaşmıştır. Demiroğlu vd., (2024)'nin çalışmasında, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile Tunable Q-Faktör Dalgacık Dönüşümü (TQWT) parametreleri optimize edilmiştir ve Hamsi Hash Fonksiyonu (Hamsi-Pat) kullanılarak sinyalin özellikleri çıkarılmıştır. 10 saniyelik alt sinyaller 25 alt banda bölünmüş ve her alt bant için 536 öznitelik elde edilerek 536 × 25 = 13400 özellik boyutuna ulaşılmıştır. Iteratif Komşuluk Bileşeni Analizi (INCA) ile en iyi özellikler seçildikten sonra K-NN algoritması ile sınıflandırılmıştır. Bu yöntem, 17 sınıflı sınıflandırmada %98,5 doğruluk oranına ulaşmış ve literatürdeki diğer çalışmalara kıyasla üstün performans göstermiştir. Fakat farklı yöntemlerin birleştirilmesi ve 'füzyon' yaklaşımının kullanılması, teorik olarak karmaşıklığı artırarak bir dezavantaj oluşturmuştur. Yöntemler arasındaki uyumun sağlanması ve her birinin optimal performans göstermesi zaman alıcı ve hesaplama açısından maliyetli olacaktır. Tablo 7'de verilen çalışmalarla karşılaştırıldığında gerçekleştirilen bu çalışma EKG sinyallerinden daha az sayıda öznitelikle ve daha az hesaplama karmaşıklığı ile yüksek doğrulukla 17 farklı aritminin sınıflandırılabileceğini göstermektedir.

Sınıflandırma modellerinin performansı, en anlamlı özelliklerin dikkatle seçilmesine bağlıdır. Gereksiz özelliklerin kaldırılması, veri kümesinin boyutunu azaltarak modelleme sürecine önemli avantajlar sağlar. Özellik sayısının azaltılmasının faydaları araştırmacılar tarafından kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Samb vd., 2012; Maldonado vd., 2014). Bu avantajlar şunlardır: Aşırı uyum riskinin azaltılması, bu sayede modelin genelleme yeteneğinin artması ve daha isabetli tahminler elde edilmesi; ayrıca, daha az özellik kullanımı sayesinde hesaplama maliyetinin düşürülmesi ve modelin daha hızlı çalışması. Bu nedenle bu çalışmada basit, hızlı ve hesaplama karmaşıklığı az olan ReliefF yöntemi ile öznitelik seçimi yapılarak çeşitli makine öğrenimi algoritmaları ile sınıflandırma gerçekleştirilmiştir.

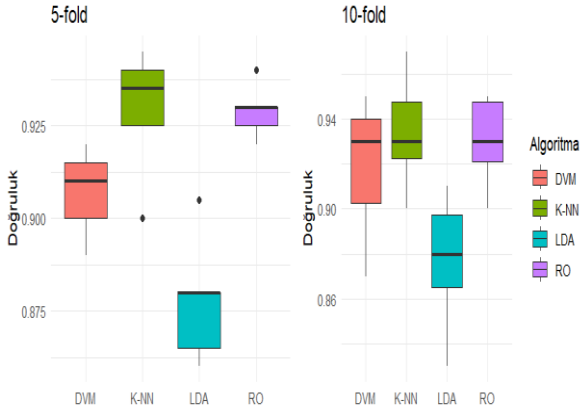
Tablo 7. Aynı veri seti ile gerçekleştirilen çalışmaların karşılaştırılması

Yazar, Çalışma yılı	Sınıf Sayısı	Öznitelik Çıkarımı	Öznitelik Seçimi	Sınıflandırma yöntemi	Sonuç (Doğruluk)
Plawiak, (2018)	17	GSY'den frekans içeriği	Genetik Algoritma	Evrimsel-Nöral Sistem (DVM tabanlı)	%90.20
Tuncer vd., (2019)	17	ADD- 3072 öznitelik	Mahalle bileşeni analizi	1D-HLP	%95
Yıldırım vd., (2018)	17	Ham verilerin ADD ile yeniden ölçeklenmesi	Yok	1B-Evrişimsel Sinir Ağı (1D-CNN)	%91.33
Plawiak ve Acharya, (2020)	17	GSY'den frekans içeriği	Genetik Algoritma	Sınıflandırıcıların derin genetik topluluğu, 3 katmanlı sistem	%94.62
Alqudah ve Alqudah, (2022)	17	irisgram'dan derin özellikler	-	2B-CNN	%97.49
Demiroğlu vd., (2024)	17	Hamsi-Pat	INCA	K-NN	%98.5
Önerilen çalışma, Altıntop, (2024)	17	zaman, frekans, zaman-frekans, entropi ve karmaşıklık öznitelikleri	ReliefF	RO, DVM, K-NN, LDA	%93.4 K-NN ile, %99.23 RO ile (SMOTE)

Şekil 11'de hem 5-fold hem de 10-fold çapraz doğrulama sonuçlarına göre algoritmaların doğruluk performansları karşılaştırılmaktadır. K-NN algoritması her iki çapraz doğrulama yönteminde de en yüksek doğruluk oranlarını göstermekte olup, diğer algoritmalara kıyasla daha tutarlı ve istikrarlı sonuçlar vermektedir. RO algoritması da oldukça yüksek doğruluk oranlarıyla dikkat çekmekte ve K-NN'ye benzer bir başarı sergilemektedir. DVM algoritması ise ortalama doğruluk açısından makul bir performans sergilemekte, ancak K-NN ve RO'ya kıyasla biraz daha düşük doğruluk göstermektedir. LDA ise her iki çapraz doğrulama yöntemi için de en düşük doğruluk

oranlarına sahip algoritma olarak öne çıkmaktadır. Özellikle LDA'nın performansı diğer algoritmalara kıyasla hem düşük hem de daha fazla değişkenlik göstermektedir. Genel olarak, K-NN ve RO'nun bu veri seti üzerinde daha üstün performans gösterdiği, DVM'nin de rekabetçi olduğu, ancak LDA'nın nispeten zayıf kaldığı bilgisine ulaşılmaktadır.

Sınıflandırma sonuçları açısından K-NN, her iki çapraz doğrulama yönteminde de %93'ün üzerinde doğruluk gösterirken, RO algoritması da benzer bir başarı sergileyerek %93 doğruluğu aşmıştır. DVM algoritması %91 civarında bir doğrulukla orta seviyede performans göstermiştir, LDA ise en düşük doğruluğa sahip algoritma olarak dikkat çekmektedir. SMOTE yöntemi ile veri sayıları dengelendiğinde ise RO algoritmasının %99.23 ile en yüksek doğruluğu sağlayan algoritma olduğu görülmektedir.



Şekil 11. ReliefF ile seçilen öznitelikler ile elde edilen doğruluk değerleri

Bunu K-NN algoritması %98.48 doğrulukla takip ederken, DVM ve LDA daha düşük doğruluk oranları sunmaktadır. Sonuç olarak, RO ve K-NN algoritmalarının genel olarak en yüksek doğruluk oranlarına sahip olduğu ve tutarlı sonuçlar verdiği, LDA'nın ise daha düşük doğruluk ve daha yüksek varyans gösterdiği söylenebilir. Bu nedenle, EKG sinyallerinden aritmi sınıflandırılması problemlerinde yüksek doğruluk ve tutarlılık arayan çalışmalar için RO ve K-NN algoritmalarının tercih edilebileceği sonucuna varılabilir.

5. Sonuç

Bu çalışmada, EKG sinyallerinden çıkarılan özniteliklerle 17 farklı kalp aritmi sınıfının yüksek doğrulukla sınıflandırılması hedeflenmiştir. Literatürdeki yöntemler genellikle yüksek veri sayısına ve karmaşık algoritmalara dayanırken, bu çalışma, daha az sayıda öznitelikle ve daha basit algoritmalarla başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, K-NN ve RO algoritmalarının, en yüksek doğruluk oranlarını sağladığını ortaya koymuştur. K-NN algoritması %93'ün üzerinde doğruluk gösterirken, RO algoritması SMOTE yöntemi ile uygulandığında %99.23 gibi olağanüstü bir başarı elde etmiştir. DVM algoritması ise rekabetçi bir performans sergilemekle birlikte, K-NN ve RO'nun gerisinde kalmıştır. LDA algoritması ise en başarısız sınıflandırma algoritması olmuştur. Bu çalışma ile bilgisayar destekli sistemlerin, klinik uygulamalarda EKG dalgalarının doğru ve tutarlı bir şekilde analiz edilmesine önemli ölçüde katkıda bulunabileceğini ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, koroner arter hastalığı, kalp yetmezliği, miyokard enfarktüsü gibi kardiyovasküler hastalıkların teşhisinde ve yönetiminde bilgisayar destekli sistemlerin kullanılmasının gerekliliğini göstermektedir. Bu çalışmanın dezavantajı veri sayısının az olmasıdır. Gelecek çalışmalarda, daha karmaşık aritmi sınıflandırma problemleri üzerinde odaklanarak bu bulguları genişletmesi ve farklı veri setleri ile örnek sayısının arttırılarak doğruluk oranının arttırılması planlanmaktadır. Bu sayede, EKG sinyallerinin analizi ve aritmi teşhisi için daha etkili ve güvenilir yöntemlerin geliştirilmesi sağlanabilecektir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	Ç.G.A.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedir.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

Afaq Y, Manocha A. 2024. Blockchain and deep learning integration for various application: a review. JCIS, 64: 92-105.

Allabun S. 2024. An intelligent learning approach for improving ECG signal classification and arrhythmia analysis. IJACSA, 15: 4.

Alqudah AM, Alqudah A. 2022. Deep learning for single-lead ECG beat arrhythmia-type detection using novel iris spectrogram representation. Soft Comput, 26: 1123-1139.

Altıntop ÇG, Latifoğlu F, Akın AK. 2022. Can patients in deep coma hear us? Examination of coma depth using physiological

signals. Biomed Signal Process Control, 77: 103756.
Bishop CM, Nasrabadi NM. 2006. Pattern recognition and machine learning. Springer, New York, USA, pp: 738.
Breiman L. 2001. Random forests. Machine learning, 45: 5-32.
Chawla NV, Bowyer KW, Hall LO, Kegelmeyer WP. 2002. SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique. JAIR, 16: 321-357.
Cortes C, Vapnik V. 1995. Support-vector networks. Mach Learn, 20(3): 273-297.
Das MK, Ari S. 2014. Electrocardiogram beat classification using S-transform based feature set. JMMB, 14:1450066.
Daydulo YD, Thamineni B, Dawud AA. 2023. Cardiac arrhythmia detection using deep learning approach and time frequency representation of ECG signals. BMC Med Inform Decis Mak, 23: 232.
Demiroğlu U, Şenol B, Matušů R. 2024. A fused electrocardiography arrhythmia detection method. Multim Tools Appl, 83: 49057-49089.
Devadas RM. 2021. Cardiac arrhythmia classification using svm, knn and naive bayes algorithms. IRJET, 8(5): 3937-3941.
Dhyani S, Kumar A, Choudhury S. 2023. Analysis of ECG-based arrhythmia detection system using machine learning. MethodsX, 10: 102195.
Dinakarrao SMP., Jantsch A, Shafique M. 2019. Computer-aided arrhythmia diagnosis with bio-signal processing: A survey of trends and techniques. ACM CSUR, 52(2): 1-37.
Ebrahimi Z, Loni M, Daneshtalab M, Gharehbaghi A. 2020. A review on deep learning methods for ECG arrhythmia classification. Expert Syst Appl, 7: 100033.
Goldberger AL, Amaral LAN, Glass L, Hausdorff JM, Ivanov PC, Mark RG, Stanley HE. 2000. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals. Circulation, 101(23): e215-e220.
Goldberger AL, Goldberger ZD, Shvilkin A. 2017. Clinical electrocardiography: a simplified approach: clinical electrocardiography: a simplified approach e-book. Elsevier Health Sciences, London, UK, pp: 187.
Gopinathannair R, Etheridge SP, Marchlinski FE, Spinale FG, Lakkireddy D, Olshansky B. 2015. Arrhythmia-induced cardiomyopathies: mechanisms, recognition, and management. JACC, 66(15): 1714-1728.
Gou J, Ma H, Ou W, Zeng S, Rao Y, Yang H. 2019. A generalized mean distance-based k-nearest neighbor classifier. Expert Syst Appl, 115: 356-372.
Gupta V, Mittal M. 2020. A novel method of cardiac arrhythmia detection in electrocardiogram signal. IJMEI, 12(5): 489-499.
Huang Z, Yang C, Zhou X, Huang T. 2018. A hybrid feature selection method based on binary state transition algorithm and ReliefF. IEEE J-BHI, 23(5): 1888-1898.
Huikuri HV, Castellanos A, Myerburg RJ. 2001. Sudden death due to cardiac arrhythmias. NEJM, 345(20): 1473-1482.
Inan OT, Giovangrandi L, Kovacs GTA. 2006. Robust neural-network-based classification of premature ventricular contractions using wavelet transform and timing interval features. IEEE TBME, 53(12): 2507-2515.
Kira K, Rendell L. A. 1992. A practical approach to feature selection. Machine learning proceedings. Elsevier, Amsterdam, Holand, pp: 249-256.
Kohli N, Verma NK. 2011. Arrhythmia classification using SVM with selected features. IJEST, 3(8): 122-131.
Kononenko I. 1994. Estimating attributes: Analysis and extensions of RELIEF. European conference on machine learning proceedings. Springer, Berlin, Germany, pp: 171-182.
Kossmann CE. 1953. The normal electrocardiogram. Circulation, 8(6): 920-936.
Liou JW, Wang PS, Wu YT, Lee SK, Chang SD, Liou M. 2022. ECG approximate entropy in the elderly during cycling exercise. Sensors, 22(14): 5255.
Maldonado S, Weber R, Famili F. 2014. Feature selection for high-dimensional class-imbalanced data sets using support vector machines. Inf Sci, 286: 228-246.
Marinho LB, Nascimento NMM, Souza JWM, Gurgel MV, Rebouças Filho PP, de Albuquerque VHC. 2019. A novel electrocardiogram feature extraction approach for cardiac arrhythmia classification. FGCS, 97: 564-577.
Martis RJ, Acharya UR, Adeli H. 2014. Current methods in electrocardiogram characterization. Comput Biol Med, 48: 133-149.
Martis RJ, Acharya UR, Lim CM, Mandana KM, Ray AK, Chakraborty C. 2013. Application of higher order cumulant features for cardiac health diagnosis using ECG signals. Int J Neural Syst, 23(04): 1350014.
Mazaheri V, Khodadadi H. 2020. Heart arrhythmia diagnosis based on the combination of morphological, frequency and nonlinear features of ECG signals and metaheuristic feature selection algorithm. Expert Syst Appl, 161: 113697.
Mian Qaisar S, Hussain SF. 2023. An effective arrhythmia classification via ECG signal subsampling and mutual information based subbands statistical features selection. J Ambient Intell Humaniz Comput, 14(3): 1473-1487.
Mishra A, Sahu SS, Sharma R, Mishra SK. 2021. Denoising of electrocardiogram signal using S-transform based time-frequency filtering approach. Arab J Sci Eng, 2021: 1-11.
Mitra M, Samanta RK. 2013. Cardiac arrhythmia classification using neural networks with selected features. Proc Technol, 10: 76-84.
Mizobuchi A, Osawa K, Tanaka M, Yumoto A, Saito H, Fuke S. 2021. Detrended fluctuation analysis can detect the impairment of heart rate regulation in patients with heart failure with preserved ejection fraction. Cardiol J, 77(1): 72-78.
Mondéjar-Guerra V, Novo J, Rouco J, Penedo MG, Ortega M. 2019. Heartbeat classification fusing temporal and morphological information of ECGs via ensemble of classifiers. Biomed. Signal Process Control, 47: 41-48.
Moody GB, Mark RG. 2001. The impact of the MIT-BIH arrhythmia database. IEEE Eng Med Biol, 20(3): 45-50.
Nascimento NMM, Marinho LB, Peixoto SA, do Vale Madeiro JP, de Albuquerque VHC, Filho PPR. 2020. Heart arrhythmia classification based on statistical moments and structural co-occurrence. CSSP, 39(2): 631-650.
Oh SL, Ng EYK, San Tan R, Acharya UR. 2019. Automated beat-wise arrhythmia diagnosis using modified U-net on extended electrocardiographic recordings with heterogeneous arrhythmia types. Comput Biol Med, 105: 92-101.
Ojha MK, Wadhwani S, Wadhwani AK, Shukla A. 2022. Automatic detection of arrhythmias from an ECG signal using an auto-encoder and SVM classifier. Phys Eng Sci Med, 45(2): 665-674.
Organization WH 2021. Cardiovascular Diseases. URL: https://www.who.int/health-topics/cardiovascular-diseases#tab=tab_1 (accessed date: October 2, 2024)
Osowski S, Linh TH. 2001. ECG beat recognition using fuzzy hybrid neural network. IEEE Trans Biomed Eng, 48(11): 1265-1271.
Peng C, Havlin S, Stanley HE, Goldberger AL. 1995. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. Chaos, 5(1): 82-87.
Pławiak P, Acharya UR. 2020. Novel deep genetic ensemble of classifiers for arrhythmia detection using ECG signals. Neural Comput Appl, 32(15):11137-11161.

Plawiak P. 2017. ECG signals (1000 fragments). Mendeley Data, v3, London, UK.

Pławiak P. 2018. Novel methodology of cardiac health recognition based on ECG signals and evolutionary-neural system. Expert Syst Appl, 92: 334-349.

Rodriguez E, Lerma C, Echeverria JC, Alvarez-Ramirez J. 2008. ECG scaling properties of cardiac arrhythmias using detrended fluctuation analysis. Physiol Meas, 29(11): 1255.

Sahoo S, Subudhi A, Dash M, Sabut S. 2020. Automatic classification of cardiac arrhythmias based on hybrid features and decision tree algorithm. IJAC, 17(4): 551-561.

Samb ML, Camara F, Ndiaye S, Slimani Y, Esseghir MA. 2012. A novel RFE-SVM-based feature selection approach for classification. IJAST, 43(1): 27-36.

Sangaiah AK, Arumugam M, Bian GB. 2020. An intelligent learning approach for improving ECG signal classification and arrhythmia analysis. Artif Intell Med, 103:101788.

Sharma LD, Rahul J, Aggarwal A, Bohat VK. 2023. An improved cardiac arrhythmia classification using stationary wavelet transform decomposed short duration QRS segment and Bi-LSTM network. Multidimens Syst Signal Process, 34(2): 503-520.

Shi H, Wang H, Huang Y, Zhao L, Qin C, Liu C. 2019. A hierarchical method based on weighted extreme gradient boosting in ECG heartbeat classification. Comput Methods Programs Biomed, 171: 1-10.

Shilaskar S, Ghatol A. 2013. Feature selection for medical diagnosis: Evaluation for cardiovascular diseases. Expert Syst Appl, 40(10):4146-4153.

Singhal S, Kumar M. 2023. A systematic review on artificial intelligence-based techniques for diagnosis of cardiovascular arrhythmia diseases: challenges and opportunities. Arch Comput Methods Eng, 30(2): 865-888.

Tuncer T, Dogan S, Pławiak P, Acharya UR. 2019. Automated arrhythmia detection using novel hexadecimal local pattern and multilevel wavelet transform with ECG signals. Knowl-Based Syst, 186: 104923.

Vásquez-Iturralde F, Flores-Calero M, Grijalva-Arévalo F, Rosales-Acosta A. 2024. Automatic Classification of Cardiac Arrhythmias using Deep Learning Techniques: A Systematic Review. IEEE Access, 12: 118467-118492.

Wan X, Liu Y, Mei X, Ye J, Zeng C, Chen Y. 2024. A novel atrial fibrillation automatic detection algorithm based on ensemble learning and multi-feature discrimination. MBEC, 62(6): 1809-1820.

Wang D, Meng Q, Chen D, Zhang H, Xu L. 2020. Automatic detection of arrhythmia based on multi-resolution representation of ECG signal. Sensors, 20(6): 1579.

Yang H, Wei Z. 2020. Arrhythmia recognition and classification using combined parametric and visual pattern features of ECG morphology. IEEE Access, 8:47103-47117.

Yang J, Yan R. 2020. A multidimensional feature extraction and selection method for ECG arrhythmias classification. IEEE Sens J, 21(13): 14180-14190.

Yeh YC, Chiou CW, Lin HJ. 2012. Analyzing ECG for cardiac arrhythmia using cluster analysis. Expert Syst Appl, 39(1): 1000-1010.

Yıldırım Ö, Pławiak P, Tan RS, Acharya UR. 2018. Arrhythmia detection using deep convolutional neural network with long duration ECG signals. Comput Biol Med, 102: 411-420.

Zimetbaum P, Goldman A. 2010. Ambulatory arrhythmia monitoring: choosing the right device. Circulation, 122(16): 1629-1636.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1553833

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Research Article
Volume 8 - Issue :3 642-649 / May 2025

SANAL GERÇEKLİK TEKNOLOJİSİ İLE BİR MÜZE TURU UYGULAMASI TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

Doğan YILDIZ[1]*, Samad HASANLI[2], Sercan DEMİRCİ[2]

[1]*Ondokuz Mayis University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 55239, Samsun, Türkiye*
[2]*Ondokuz Mayis University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 55239, Samsun, Türkiye*

Özet: Son yıllarda, gerçeklik teknolojilerine olan talebin artmasıyla birlikte bu alandaki uygulamaların kullanımı da yaygınlaşmıştır. Bu teknolojiler, farklı sektörlerde çeşitli yenilikler ve kolaylıklar sunarak birçok alanda çalışmaların ve araştırmaların odak noktası haline gelmiştir. Sanal gerçeklik (Virtual Reality, VR) teknolojisi, bu teknolojiler arasında en yaygın kullanılanlardan biridir. Bunun temel nedeni, VR'nin sağladığı etkileyici deneyimler sayesinde kullanıcıları sanal bir ortamın içine çekerek onların etkileşim düzeyini artırmasıdır. VR teknolojisinin en sık kullanıldığı alanlar arasında tıp, mühendislik, turizm, eğitim ve eğlence sektörleri yer almaktadır. Bu bağlamda, müze turları da VR teknolojisinin sunduğu fırsatlardan yararlanarak insanların bilgi edinmesini, kültürel etkileşimini artırmasını ve keyifli vakit geçirmesini sağlayan önemli bir uygulama alanı haline gelmiştir. Günümüzde birçok müze, ziyaretçilerine daha etkileyici ve interaktif bir deneyim sunabilmek adına sanal müze turları geliştirmektedir. Bu tür uygulamalar, fiziksel olarak bir müzeyi ziyaret etme imkânı bulamayan kişilere, sanal ortamda müzeleri keşfetme ve sergilenen eserler hakkında bilgi edinme fırsatı sunmaktadır. Bu çalışmada, VR teknolojisi kullanılarak bir müze turu uygulaması geliştirilmiştir. Kullanıcılar, uygulama aracılığıyla çeşitli müzeleri ziyaret edebilmekte ve müzelerde bulunan eserler hakkında detaylı bilgilere ulaşabilmektedir. Uygulamanın geliştirilme sürecinde, modellerin tasarlanması için Autodesk 3ds Max yazılımı kullanılmış, sanal ortamın oluşturulması için ise Unity 3D oyun motorundan faydalanılmıştır. Kullanıcının sanal ortamda kendini gerçek bir müze içerisindeymiş gibi hissedebilmesi için görsel daldırma tekniği kullanılmıştır. Bu sayede, kullanıcıların müze turu deneyimini daha etkileyici ve gerçekçi bir şekilde yaşayabilecekleri düşünülmektedir.
Anahtar kelimeler: 3ds max, Sanal gerçeklik, Unity 3D

Design and Development of Museum Tour Application with Virtual Reality Technology

Abstract: In recent years, with the increasing demand for reality technologies, the use of applications in this field has also become widespread. These technologies have become the focus of studies and research in many fields by offering various innovations and conveniences in different sectors. Virtual reality (VR) technology is one of the most widely used among these technologies. The main reason for this is that VR immerses users in a virtual environment and increases their level of interaction thanks to the impressive experiences it provides. The fields where VR technology is most frequently used include medicine, engineering, tourism, education, and entertainment. In this context, museum tours have become an important application area that allows people to gain information, increase their cultural interaction, and have a pleasant time by taking advantage of the opportunities offered by VR technology. Today, many museums are developing virtual tours to offer visitors a more impressive and interactive experience. Such applications allow people who cannot physically visit a museum to explore museums in a virtual environment and learn about the works on display. In this study, a museum tour application was developed using VR technology. Users can visit various museums through the application and access detailed information about the works in the museums. During the development process of the application, Autodesk 3ds Max software was used to design the models, and Unity 3D game engine was used to create the virtual environment. The visual immersion technique made the user feel like they were in a real museum in a virtual environment. In this way, it is thought that users will be able to experience the museum tour in a more impressive and realistic way.
Keywords: 3ds max, Virtual reality, Unity 3D

***Sorumlu yazar (Corresponding author):** Ondokuz Mayis University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 55239, Samsun, Türkiye
E mail: dogan.yildiz@omu.edu.tr (D. YILDIZ)
Doğan YILDIZ https://orcid.org/0000-0001-9670-4173
Samad HASANLI https://orcid.org/0009-0004-1629-9825
Sercan DEMİRCİ https://orcid.org/0000-0001-6739-7653

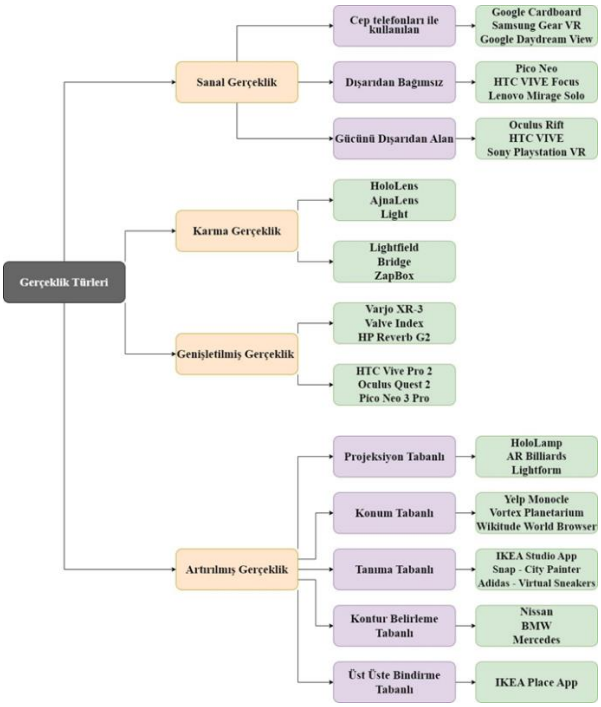
Gönderi: 23 Eylül 2024 **Received:** September 23, 2024
Kabul: 02 Mart 2025 **Accepted:** March 02, 2025
Yayınlanma: 15 Mayıs 2025 **Published:** May 15, 2025
Cite as: Yıldız D, Hasanlı S, Demirci S. 2024. Design and development of museum tour application with virtual reality technology. BSJ Eng Sci, 8(3): 642-649.

1. Giriş

Geçmişten günümüze teknolojide önemli ilerlemeler ve değişiklikler meydana gelmiştir. Bu süreçte insanlar teknolojiyi hızla öğrenmiş ve teknolojinin hızlı yaygınlaşması birçok alanı etkilemiştir. Teknolojinin hızlı büyümesiyle birlikte, insanlar bilgisayar ve telefon gibi araçlarla daha fazla etkileşime girmiştir ve bu araçlara olan ilgi artmaya başlamıştır (Kudver, 2022). Haberleşme teknolojilerinin gelişmesiyle beraber, gerçeklik teknolojilerinin kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Gerçeklik teknolojileri artırılmış gerçeklik (Augmented Reality, AR), karma gerçeklik (Mixed Reality, MR), genişletilmiş gerçeklik (Extended Reality, XR) ve sanal gerçeklik (Virtual Reality, VR) olmak üzere 4 gruba

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

ayrılmaktakdır: AR, bilgisayarda sanal ortam (Virtual Environment, VE) eklenerek artırılmış bir nesnenin gerçek zamanlı görünümü şeklinde tanımlanmaktadır. AR, gerçek ve sanal nesneleri birleştirerek, etkileşimli ve kayıtlı bir 3-boyutlu (Three Dimensional, 3D) nesne oluşturmaktadır (Carmigniani ve Furht, 2011). AR işaretçi tabanlı (Marker Based, MB) ve işaretsiz (Markerless, ML) olmak üzere 2 türe ayrılmaktadır. ML'nin de projeksiyon tabanlı, konum tabanlı, tanıma tabanlı, kontur belirleme ve üst üste bindirme gibi türleri vardır. Projeksiyon tabanlı gerçeklikte, insanların teknolojiyle etkileşime girmesi için yansıtılan yapay ışığın dokunmayı algılaması önemlidir. Kullanıcının dokunmayı algılaması için beklenen proje ve değiştirilmiş proje arasında ayrım yapması gereklidir. Konum tabanlı gerçeklikte, konuma dayalı ve dijital pusula (Digital Compass, DC), ivmeölçer (Accelerometer, ACC), hızölçer (Speedometer, SDO) veya küresel konumlama sistemi (Global Positioning System, GPS) tarafından sunulan veriler sağlanmaktadır. Bu gerçeklik, kullandığımız akıllı telefon gibi cihazlarda bulunan konum algılama özelliği ile tanımlanmaktadır. Tanıma tabanlı gerçeklikte ise 2-boyutlu (Two Dimensional, 2D) veya hızlı cevap (Quick Response, QR) kodu gibi bir kamera ve işaretleyiciden yararlanılmaktadır. Okuyucu, işaretçiyi algılayarak çıktı vermektedir (Aggarwal ve Singhal, 2019). Kontur belirlemeli gerçeklik, kontur çizgileriyle görülmesi zor olan nesnelerin hatlarının belirlenmesinde kullanılır. Üst üste bindirmeli gerçeklikte nesnelerin hepsi veya bir kısmı AR'ye dönüştürülür. Ayrıca, nesnelerin döndürülmesine, görüntülenmesine ve yaklaştırılmasına olanak sağlamaktadır. VR, MR için kavramsal ve tarihsel bir temel oluşturmuştur. VR daldırmada görsel, işitsel ve görsel olmayan yöntemler kullanılmaktadır. MR sistemlerinde kullanıcılar, hem çevrelerindeki fiziksel ortamı hem de yarı saydam ekranların kullanımı yoluyla sunulan dijital unsurları algılarlar. MR sistemlerinin amacı, tüketicilere sanal ve gerçek dünyadaki nesnelerin aynı ortamda olduğu hissini sağlamaktır. Bu yansımayı oluşturmak için dijital nesneler gerçek ortama doğru bir şekilde yerleştirilmelidir ve gerçek nesnelerle hizalanmalıdır (Costanza vd., 2009). XR, son dönemlerde AR, VR ve MR için bir arada kullanılan bir terim olarak tanımlanmaktadır. XR cihazları, kontrol cihazları ile kullanıcı tarafından kullanılabilmektedir. Bu cihazlarda düğmeye basma girişlerinin dışında başka yetenekler de vardır (Andrews vd., 2019). VR kavramını anlayabilmek için her iki kelimenin tanımlanması gerekmektedir. Gerçeklik, "insanların hayal edebilecekleri değil, gerçekten deneyimlenen veya görülen bir şey" olarak tanımlanırken, sanal "neredeyse belirli bir şey" olarak tanımlanmaktadır (Akdaş ve Çalgüner, 2021). VR'ın, gerçeklik algısını geliştirmek için birleştirilebilen veya ayrılabilen beş özelliği vardır. Bunlar üç boyutlu ve iki boyutlu düzlemsel görüntüleme, dinamik ve statik ekran, kapalı döngü ve açık döngü etkileşimi, içeriden dışarıya ve dışarıdan içeriye referans çerçevesi ve geliştirilmiş duyusal deneyimdir. Bu beş bileşen arasında belirli derecede karşılıklı bağımlılık vardır (Wickens, 1992). VR teknolojisi cep telefonları ile birlikte, dışarıdan bağımsız ve gücünü dışarıdan alan olmak üzere 3 kategoriden oluşmaktadır. Şekil 1'de yukarıda bahsedilen gerçeklik türleri hakkında bir sınıflandırma gösterilmiştir. VR teknolojisi, gelişen bilgisayar donanımı, yazılımı ve sanal dünya entegrasyonu ile daha sürükleyici bir hale gelmiştir. Bu teknolojiler, gerçek zamanlı iletişim oluştuktan sonra kullanıcıların diline, şekline ve başka özelliklerine göre tepki verebilmektedir. Bu nedenle, VR teknolojileri son yıllarda şirketlerin ve akademisyenlerin ilgisini çekmiştir (Raja, 2019). VR, kullanıcının gerçeğe yakın keşfedebileceği ve etkileşim kurabileceği 3D bir dünya üretmeyi amaçlamaktadır (Gutiérrez vd., 2008). Geszten vd., (2015) çalışmasına göre, üç boyutlu (3D) ortamlar; sanal ve gerçek dünya arasındaki etkileşimsel benzerlikler sayesinde, kullanıcıların etkileşime açık nesneler ve geçilebilir mekânlardan oluşan sanal dünyalara dâhil olmalarını mümkün kılmaktadır. Başka bir deyişle, VR gerçeğe yakın veya gerçekçi deneyimler sağlar (Hale ve Stanney, 2014). Tablo 1'de yapılan literatür taramasında araştırılan makalelerden alınmış verilerle VR'ın kullanım alanları hakkında bilgiler verilmiştir (Claudio ve Maddalena, 2014; Kamińska vd., 2019; Sirror vd., 2021).



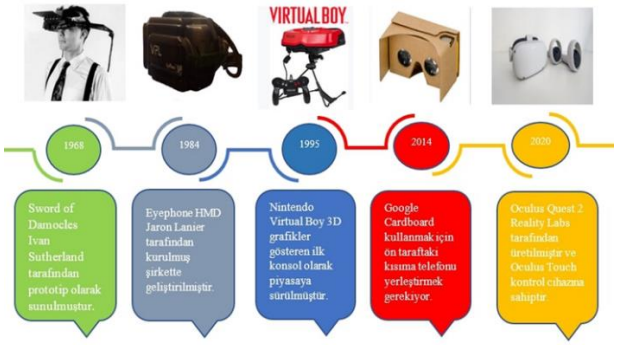
Şekil 1. Gerçeklik türleri sınıflandırması.

Şekil 2'de VR gözlüklerinin kronolojik sıralaması gösterilmiştir. Sword of Damocles, bir bilgisayar bilimcisi olan Ivan Sutherland ve öğrencileri Bob Sproull, Quintin Foster ve Danny Cohen'in katkılarıyla 1968 yılında prototip olarak geliştirilmiştir. Her türlü ekranı simule edebilme özelliğine göre, bu prototip geliştirilmeden önce "nihai ekran" olarak adlandırılmıştır. Eyephone HMD, 1984 yılında Jaron Lanier tarafından kurulan şirkette geliştirilmiştir. Bu sistem özel gözlük ve Data Glove

eldivenleri sayesinde nesneleri görebilir ve hareket ettirebilirdi. Virtual Boy, 1995 yılında Nintendo şirketi tarafından geliştirilmiştir ve stereoskopik 3D grafikler gösteren ilk konsol olarak tarihe geçmiştir. Konsol başa monte edilerek kullanılabilir ve oyun kolu ile hareket ettirilebilir. Google Cardboard, Google şirketi tarafından 2014 yılında tanıtılmıştır. Gözlüğü kullanmak için uyumlu uygulamayı açıp cihazın ön tarafına yerleştirmek yeterlidir. Oculus Quest 2, Reality Labs tarafından 2020 yılında piyasaya sürülmüştür. Bu gözlük; geliştirilmiş dâhili özelliklere, yüksek yenileme hızına, yüksek çözünürlük sağlayan bir ekrana ve geliştirilmiş pil ömrü bulunan Oculus Touch kontrol cihazlarına sahiptir. Jung vd., (2016), müze ziyareti sırasında kullanılan gerçeklik teknolojilerinin, ziyaretçilerin bu teknolojileri yeniden deneyimlemek istemesini etkilediğini tespit etmiştir. Southall vd., (2019), VR'ın özelleştirilmiş ve kişiselleştirilmiş kültürel miras deneyimleri imkânı sunduğunu keşfetmiştir. Ayrıca, Han vd., (2019) sanal gerçekliğin kültürel miras ortamında kullanıcıların düşünerek öğrenme sağlayabileceğini ortaya koymuştur. Tom Dieck vd., (2019), sanal gerçekliğin insanların kolayca erişemeyeceği yerleri veya öğeleri görüntülemesine izin verebileceğini tespit etmiştir.

Tablo 1. Sanal Gerçeklik kullanım alanları

Alan	Alan Türleri	Artı Etkileri	Yapılan çalışmalar
Eğitim	Mühendislik Eğitimi, Tıp Eğitimi, Özel İhtiyaç	Bireyleri endüstriyel ortamlar için eğitmek, uzmanlara ve hemşirelere tıbbi becerilerinin gelişiminde yardım etmek	(Valdez vd., 2015), (Górski vd., 2016), (Schultheis ve Rizzo, 2001)
Tıp	Terapi, Cerrahi Simülasyon, Tıbbi Eğitim	Fizyolojik prensipleri ve anatomiyi kavramak, araştırma sonuçlarına göre hastanın sanal gerçeklik modelini oluşturmak	(Desender vd., 2011), (Mabrey vd., 2010), (Ntakakis vd., 2023)
Mimarlık	Mimari Tasarım, Yapı analizi ve tasarımı, İnşaat	Mekansal yönleri (malzemelerin rengi ve dokusu) kavrayabilmek, yapısal analiz ve tasarım öğrenme yeteneklerini geliştirme	(Samarasinghe vd., 2019), (Pedro vd., 2016), (Young vd., 2012)



Şekil 2. Sanal Gerçeklik teknolojilerinin sıralaması.

Müzelerde, gizli yerleri araştırmak veya eşyaları hayata döndürmek için ulaşılabilirlik çok önemlidir. Pallud ve Straub (2014) popüler müze web sitelerinin, ziyaretçilere fiziksel müzeyi ziyaret etmeleri için ilham verdiğini tespit etmiştir. 2015-2016 yılları arasında WONDER sergisi büyük ilgi görmüştür. Washington DC'de bulunan Amerikan Sanat Müzesi'nin Renwick galerisi, kullanıcılarına WONDER 360 yazılımı ile WONDER sergisinin güzelliğini zaman içinde bir an olarak yakalamayı ve galerinin görüntülerini, bulundukları ortamı terk etmeden deneyimlemeyi sağlamıştır (Anonymous, 1995). Bu çalışmada, farklı temalara sahip çeşitli müzeleri içeren interaktif bir müze turu uygulaması geliştirilmiştir. Uygulamanın modelleme sürecinde Autodesk 3ds Max yazılımı kullanılmış, sanal ortamın oluşturulması ve etkileşim mekanizmalarının tasarlanması için Unity 3D oyun motorundan yararlanılmıştır. Geniş bir kullanıcı kitlesine hitap edebilmek adına, uygulama bünyesinde dinozor müzesi, NFT müzesi ve sanat müzesi olmak üzere üç farklı müze teması belirlenmiştir. Kullanıcılar, herhangi bir VR gözlüğü veya akıllı telefon aracılığıyla bu müzeleri keşfedebilmekte ve sergilenen eserler hakkında detaylı bilgilere erişebilmektedir. Bu uygulamanın temel amacı, müzelere ilgi duyan ancak fiziksel olarak ziyaret etme imkânı bulamayan bireyler için erişilebilir ve etkileşimli bir deneyim sunmaktır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu kısımda uygulamanın geliştirilme aşamaları, görsel daldırma (Visual Immersion, VI) ve kullanılmış olan diğer teknoloji başlıkları hakkında bilgiler verilmiştir. Uygulamanın yapımında bulunan tüm aşamalar detaylı olarak anlatılmaktadır.

2.1. Uygulama Yapım Aşamaları

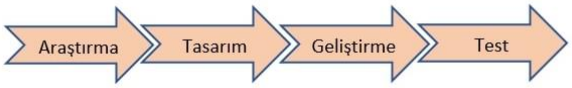
Uygulama tasarlanması ve geliştirilmesi 4 aşamadan oluşmaktadır: Araştırma, uygulama tasarımı, uygulama geliştirme ve uygulama testi.

- 1. Adım: Bu adımda uygulamada kullanılacak olan yazılımlar ve donanımlar araştırılmıştır. Bu alanda ve bu alana benzer yapılan çalışmalar ve kullanılacak teknikler incelenmiştir. Araştırmalar sonucunda uygun yazılımlar ve donanımlar seçilerek uygulamaya başlanmıştır.
- 2. Adım: Bu adımda gerekli yazılımı seçtikten sonra, uygulamadaki müzelere uygun olarak modeller

tasarlanmıştır. Modellerin yapımında Unity 3D uygulamasında bulunan Model Mağazası (Asset Store, AS) eklentisinden de yararlanılmıştır.

- 3. Adım: Bu adımda oyun motorları ve yazılım araçları kullanılarak, uygulama ortamları ve nesneler oluşturulmuştur. Programlama dili kullanılarak, hareket ettirme özelliği eklenmiştir. Ayrıca, uygulama dinamikleri ve ses efektleri de burada eklenmiştir.
- 4. Adım: Bu adımda ise uygulamanın oynanabilirliği test edilmiştir. Test aşamasında çalışmadaki kişiler uygulamayı denemiştir ve değerlendirmiştir.

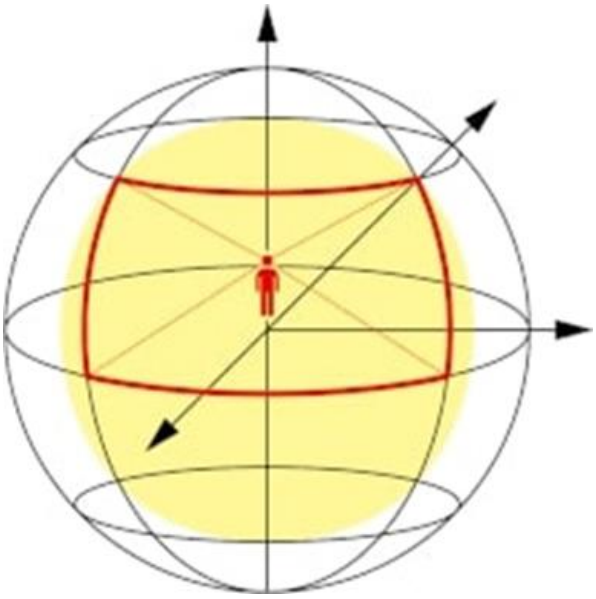
Şekil 3'de uygulama sürecinde yapılan aşamalar gösterilmiştir.



Şekil 3. Uygulamanın yapım aşamaları.

2.2. Görsel daldırma (VI)

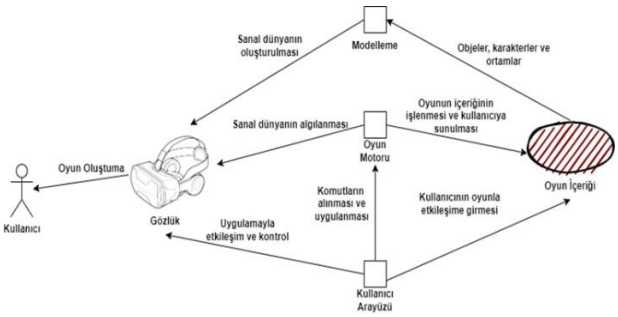
VI'nın amacı, kullanıcıda sanal dünya içerisinde ses ve görüntü kullanarak gerçekten oradaymış hissi uyandırmaktır. VR ortamlarında, daldırma ve uzakta var olma hissi önemli olduğu için bu ortamlar daldırma açısından gerçekçi oluşturulmalıdır. Daldırmada çözünürlük önemlidir. İki piksel arasındaki en kısa mesafe, genel olarak açısal saniyelerle (arc - seconds, arcsec) ölçülmektedir. Sıklıkla kullanılan çözünürlük ise 30 - 65 arcsec'tir. Küçük ölçülü ekranların birçoğu, gecikmesi 15 milisaniye (millisecond, ms) olan 60 yenileme hızı (Hertz, Hz) 'na sahiptir. Bu hız, 120 Hz, 240 Hz veya daha fazlasına yükseltilirse, gecikme 7 ms'in altına düşürülür. Kullanıcıların kendilerini VR'a daha fazla dalmış ve gerçekçi hissetmelerini sağlamak için daha fazla saniye başına kare (Frame Per Second, FPS) işleyecek kadar güçlü işleme birimine (Graphics Processing Unit, GPU) sahip cihazlar kullanılmalıdır. Görüş alanı (Field Of View, FOV) da görüntü kalitesi kadar önemli faktörlerdendir. Gözlerin yatay FOV'u yaklaşık 120 derece, dikey FOV'u ise yaklaşık 135 derecedir. Stereopsis görme, sağ ve sol gözler için 120 derecelik kesişme ile sınırlıdır. Genel olarak insanlar, iki gözle 200 derece x 135 derecelik bir FOV'a sahiptir. Fakat, bu görüş açıları kişiden kişiye değişim gösterebilmektedir. Bu nedenle, çoğu zaman ortalama olarak 160 derece görme açısı dikkate alınmaktadır. Sonuç olarak, normal bir katılımcı gözlerini hareketsiz tutarsa 160 x 135 derecelik bir stereopsise veya 360 derecelik görüş alanının 1/6'sına sahip olacaktır. Uygulamada VI kullanımına özen gösterilmiştir. Uygulamayı kullananların görüş alanında, gerekli nesnelerin olmasına dikkat edilmiştir. Şekil 4'te uygulama içinde görüş alanı ve izleme alanının nasıl görüntülendiği verilmiştir.



Şekil 4. Görüş alanı (sarı) ve izleme alanı (kırmızı).

2.3. Uygulama geliştirilmesinde kullanılan teknolojiler

Bu araştırmada uzaktan, çevrimiçi müze gezilebilmesine imkân sağlayan bir VR uygulaması geliştirilmiştir. Modelleme için Autodesk 3ds Max kullanılmıştır. Uygulamada, 3D nesneler ve geliştirilen modellerin hepsi Unity 3D oyun motorunda birleştirilmiştir. Kodlama kısmında ise Visual Studio uygulaması aracılığıyla C# programlama dili kullanılmıştır. Uygulamada sanal gerçeklik gözlüğü olarak Shinecon VR gözlüğü kullanılmıştır. Çalışmanın geliştirme aşamasına ait akış şeması Şekil 5'de yer almaktadır.

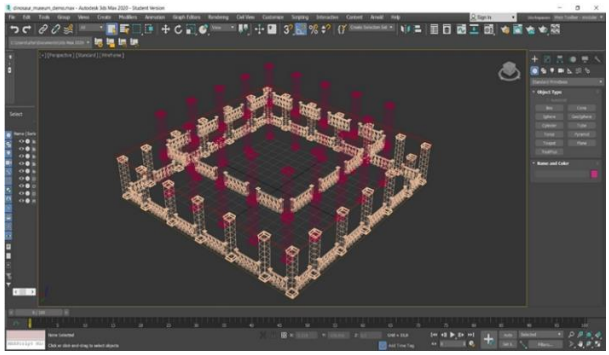


Şekil 5. Uygulamanın akış şeması.

2.3.1. Autodesk 3ds Max

3D tasarım için kullanılması gereken program, çalışmanın gereksinimleri üzerine seçilmelidir. Günümüzde 3ds Max, Blender, Sculptris, Meshmixer, Vectary ve Ultimaker Cura gibi 3D nesne modelleme programları vardır. Autodesk 3D Studio, Autodesk Media and Entertainment firması tarafından 1990 yılında geliştirilmiştir ve dördüncü versiyondan sonra ismi 3D Studio Max olarak değiştirilmiştir. Autodesk 3D Studio Max, açık kaynak kodlu üç boyutlu modelleme programıdır. Uygulama, eğitimcilere ve öğrencilere ücretsiz şekilde sunulmaktadır. Programın kolay kullanımı ve eklenti desteğinin olması önemli özelliklerindendir. Karakter

modellemesi sayesinde, birçok alanda kullanılması mümkündür (Çorak vd., 2019). Autodesk 3D Studio Max, ışık yansımaları ve oyun yapımı konusunda da avantajlıdır. Tasarlanacak modelin boyutlandırılmasında ölçü, renk ve konum niteliklerini kullanmaktadır (Yağmurlu, 2017). 3D Studio Max uygulaması, .max uzantılı dosyaları direkt olarak desteklemektedir. Uygulama, .fbx, .3ds, .abc, .ai, .ase, .ass, .dae, .dwf, .dwg, .dxf, .flt, .htr, .igs, .obj, .pbxproj, .sat, .stl, .svf, .wrl uzantılı model dosyalarını da kullanabilmektedir. Ayrıca, animasyon yapımını da mümkün kılmaktadır. Şekil 6'da, uygulamada bulunan dinozor müzesinin taslak modellerinden biri görselde sunulmuştur. Modelleme yaparken taslaktan sonra malzeme kalitesi oluşturulmalıdır. Şekil 7'de ise programın malzeme editörü kullanılarak duvarlar, zeminler ve yüzeyler oluşturulmuştur.



Şekil 6. Müzenin modelleme aşamasındaki görüntüsü.



Şekil 7. Malzeme kalitesi eklendikten sonraki görüntü.

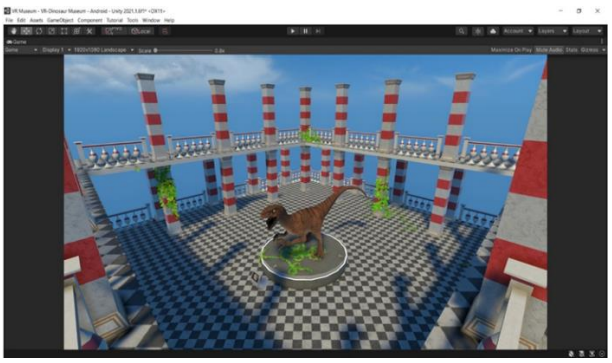
Müzenin duvarları, dinozor heykelleri, ışık aydınlatması ve bilgi panosu uygulamada yapılmış olan gerçekçi özellikler olarak görülebilmektedir. Uygulamadaki bu 3D öğelerin amacı, kullanıcıların gerçekliğe daha yakın hissetmelerini sağlamaktır. Uygulamada, animasyonlar aracılığıyla da modeller yapılabilmektedir. Şekil 8'de NFT müzesinde renkli duvarda görülen animasyonlar otomatik olarak değişmektedir. Bu alanda heykellerin altındaki zeminler, doku kalitesi ile yapılmıştır.



Şekil 8. NFT müzesinden görsel.

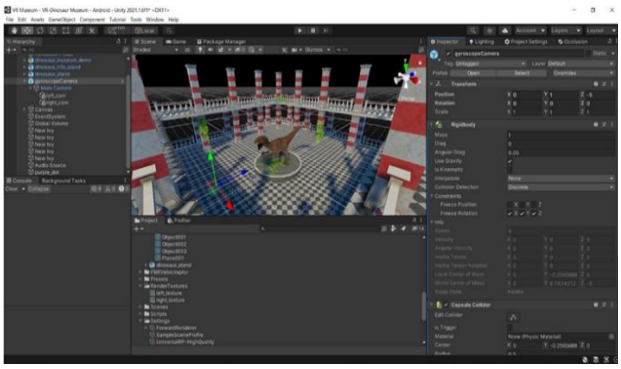
2.3.2. Unity 3D

Unity 3D, Unity Technologies tarafından geliştirilen, bilgisayarlarda, oyun konsollarında ve mobil cihazlarda oyun geliştirilmesini sağlayan çapraz platform bir oyun motorudur. Unity 3D oyun motorunun gelişmiş özellikleri ile üç boyutlu oyunlar bilgisayara kurulmadan kullanılabilmektedir. Bu gelişmiş özellikler, oyun dünyasına yenilik getirmiştir. Programlama dili ile kod yazılması, iki boyutlu ve üç boyutlu modellerin rahatça kullanılması programın artılarındandır. Unity'de geliştirilen oyunların, herhangi bir işlem yapmadan istenilen platforma entegre olması mümkündür (Boyraz vd., 2019). Unity oyun platformu küçük geliştiriciler için kısıtlı sürümleri, öğrenciler için ise full sürümleri ücretsiz şekilde sunmaktadır. Unity'nin dokümantasyonları internette kolay bulunduğu için yaşanacak olan problemler kolayca çözülebilir. Unity oyun motoru, .fbx, .max, .obj gibi uzantılı 3D model dosyalarını başka bir formata dönüştürme ihtiyacı duymadan kullanımına izin vermektedir. Ayrıca, Unity AS'da çok fazla araç ve modeller bulunmaktadır (Anonymous, 2009). 3D Studio Max'ta oluşturulan modeller, .fbx (Filmbox, FBX) dosya uzantısı ile Unity 3D oyun motoruna aktarılmıştır. FBX formatı, hem 3ds Max hem de Unity'de desteklenen 3D model, malzeme bilgileri ve animasyonlar içeren bir dosya formatıdır. Bu format, bilgileri koruduğu için tasarlanan sahneler ve objeler Unity içinde kullanılmıştır. Unity oyun motorunun sunmuş olduğu Model Mağazası AS bu işlem sırasında modellemede yardımcı olmuştur. Programda AS seçeneğine tıklanıp ilgili model bulunduktan sonra, 'Add to My Assets' butonuna tıklanarak modeller indirilebilmektedir. Bu aşamadan sonra 'Import' butonuyla seçilen model içe aktarılıp ekrana sürüklenerek istenilen şekilde özelleştirilebilmektedir. Şekil 9'da AS'dan alınan dinozor modeli bulunmaktadır.



Şekil 9. AS'dan alınmış model.

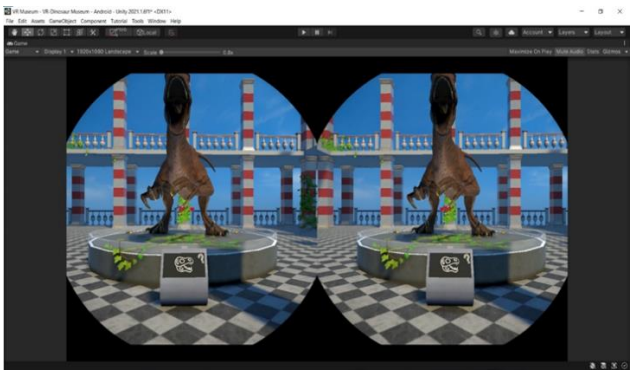
VR mantığı gereği ile uygulamada karakterin tasarlanması zorunluluğu bulunmamaktadır. VR uygulamalarını deneyimleyenler, görüntüleri "karakterin" gözlerinden gördüğü için karakterin kendisini görememektedirler. Bu yüzden, karakter oluşturmaya ihtiyaç duyulmamıştır. Oyunda bulunan kameranın, düzgün ayarlanması yeterli görülmüştür. Şekil 10'da Unity programında, oyun yapımı sırasında alınmış ekran görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 10. Oyunun yapım aşamasından alınmış görüntü.

2.3.3. Shinecon VR

Shinecon VR (Şekil 7), 2010 yılında Dongguan Shinecon Industrial tarafından üretilmiştir. Bu gözlük, birçok mobil cihazla uyumludur (Anonymous, 2005). Kullanıcıların gözlüğü kullanması için mobil cihazlarını gözlüğün ön kısmına yerleştirmeleri yeterlidir. Ses alımı için ise yan taraflarda kulaklıklar bulunmaktadır. Gözlüğün yukarısındaki buton sayesinde de karakter hareketleri kontrol edilmektedir. Gözlük kullanımı için gerekli ve yeterli alan önceden seçilmelidir. Şekil 11'de uygulama hazırlanırken gözlük kullanılarak test edilmesi gerçekleştirilmiştir. Uygulama açıldıktan sonra gözlük takılıp buton sayesinde istenildiği gibi hareket edilebilmektedir. Bilgi almak için modelin altındaki panoya bakmak gerekmektedir.



Şekil 11. Uygulamanın gözlükle test edilme aşaması.

3. Tartışma

VR teknolojisinin hızla yaygınlaşması, bu alandaki bilimsel çalışmaların ve endüstriyel uygulamaların artmasına neden olmuştur. (Marín-Morales vd., 2020), VR ile duygu analizi arasındaki bağlantıyı inceleyen bir araştırma yürütmüş ve her yıl yayınlanan akademik makale sayısındaki artışı değerlendirmiştir. Çalışmada incelenen ilk makale 1995 yılında yayımlanmış olup, 1990'lı yıllarda yıllık ortalama 6,4 makale yayımlandığı tespit edilmiştir. 2000'li yıllarda bu sayı 26,3'e yükselmiş, 2010-2014 yılları arasında ise tahmini üç katına çıkarak 77,4'e ulaşmıştır. Son beş yılda ise bu artış ivme kazanarak 2019 yılında 203'e, 2020 yılında ise 278'e ulaşmıştır. Bu istatistikler, VR teknolojisinin akademik dünyada ve endüstride giderek daha fazla ilgi gördüğünü ortaya koymaktadır. Aynı zamanda, bu artış, tüketicilerin VR teknolojisine olan ilgisinin ve bu teknolojinin sunduğu olanakların etkileyici bir şekilde arttığını da göstermektedir. Geliştirilen VR tabanlı müze turu uygulaması, kullanıcıların sanal ortamda etkileşim kurmasını sağlayarak fiziksel müzelere erişim imkânlarını genişletmektedir. Kullanıcılar, VR gözlüğü ve diğer donanımları kullanarak uygulamanın giriş alanında sanal bir ortamda bulunmaktadır. Buradan itibaren, diledikleri müzeye giriş yapabilmekte ve seçilen müze içerisinde sergilenen nesneleri detaylı bir şekilde inceleyebilmektedir. Uygulamada üç farklı müzenin bulunması, farklı yaş gruplarından ve ilgi alanlarından kullanıcılar için çeşitlilik sunmaktadır. Bu, özellikle eğitim amaçlı kullanımda VR tabanlı müze uygulamalarının potansiyelini artırmaktadır. Gerçekleştirilen kullanıcı testlerinde, Shinecon VR gözlüğünü kullanan katılımcılar uygulamayı deneyimlemiştir. Hareket mekanizması, ışınlanma yöntemi ile düzenlenmiş olup, gözlüğün üst kısmındaki buton aracılığıyla kullanıcıların belirli noktalara ışınlanarak hareket etmeleri sağlanmıştır. Bu yöntemin tercih edilmesi, geleneksel yürüyüş simülasyonlarında sıklıkla karşılaşılan denge bozukluğu ve baş dönmesi gibi olumsuz etkileri minimize etmiştir. Test sürecinde, VR gözlüğünün kısa süreli kullanımında herhangi bir olumsuzluk bildirilmemiştir. Ancak uzun süreli kullanımda bazı katılımcılarda göz yorgunluğu, kızarıklık ve baş ağrısı gibi fiziksel rahatsızlıklar gözlemlenmiştir. Bu bulgular, VR teknolojisinin uzun

süreli kullanımına bağlı olarak ortaya çıkabilecek fizyolojik etkilerin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Bununla birlikte, kullanıcıların büyük bir çoğunluğu VR gözlüğü ile sanal müze ortamında gezmekten keyif aldıklarını ifade etmiştir. Kullanıcıların VR teknolojisi aracılığıyla sunulan etkileşimli deneyimi gerçekçi ve ilgi çekici bulmaları, bu tür uygulamaların kültürel mirasın korunması, müze deneyiminin yaygınlaştırılması ve eğitim amaçlı kullanımı açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle fiziksel müzelere erişimde zorluk yaşayan bireyler için VR tabanlı çözümler, alternatif bir deneyim sunarak kapsayıcılığı artırmaktadır. Sonuç olarak, geliştirilen VR tabanlı müze turu uygulaması, sanal ortamda etkileşimli bir müze deneyimi sunarak kullanıcıların kültürel ve eğitsel içeriklere erişimini kolaylaştırmaktadır. Kullanıcı geri bildirimleri doğrultusunda, gelecekte VR gözlüklerinin konforunu artırmaya yönelik iyileştirmeler yapılması ve uygulamanın daha kullanıcı dostu hale getirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, VR teknolojisinin eğitim, sanat ve kültürel miras alanlarındaki kullanım potansiyelinin daha derinlemesine araştırılması, bu alandaki gelişmelere katkı sağlayacaktır.

4. Sonuç

Bu araştırmada, VR teknolojisi kullanılarak etkileşimli bir müze turu uygulaması geliştirilmiştir. Geliştirilen uygulamada, VR gözlüğü aracılığıyla kullanıcıların sanal müzeleri gezmesi sağlanmış ve böylece mekânsal sınırlamaların ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. VR teknolojisinin sağladığı gerçeklik hissini artırmak için, uygulama içerisinde yüksek kaliteli 3D modeller, gerçekçi dokular ve animasyonlar kullanılmıştır. Bu unsurlar, kullanıcıların sanal ortama uyum sağlamasına ve daha immersif bir deneyim yaşamasına katkıda bulunmuştur. Çalışma kapsamında, gerçeklik teknolojilerinin taksonomisi, VR gözlüklerin gelişim süreci ve uygulamada kullanılan yazılım mimarisine ilişkin akış şemaları sunulmuştur. Uygulamanın geliştirme aşamasında, müzelerde sergilenen eserlerin ve heykellerin 3D modellemeleri Autodesk 3ds Max programı kullanılarak oluşturulmuş ve ardından Unity 3D oyun motoruna entegre edilmiştir. Unity 3D'nin sağladığı fizik motoru ve görsel efektler sayesinde, VR gözlüğü takan kullanıcılar müzeler içinde serbestçe hareket edebilmekte ve sergilenen nesneler hakkında bilgi edinebilmektedir. Kullanıcı deneyimini güçlendirmek ve gerçeğe yakın bir ortam sunabilmek amacıyla uygulamada VI tekniği kullanılmıştır. Bu sayede, hem görsel hem de işitsel olarak daha tatmin edici bir kullanıcı deneyimi elde edilmiştir. Araştırmanın temel amacı, farklı yaş gruplarına hitap eden sanal müze turları sunarak, kullanıcıların kültürel miras ve sanat eserleri hakkında bilgi edinmesini kolaylaştırmaktır. Gelecek çalışmalarda, uygulamanın daha da geliştirilmesi için çeşitli iyileştirmeler yapılabilir. Öncelikle, müzelerde yer alan 3D model ve animasyonların sayısı artırılarak, daha geniş bir koleksiyon sunulabilir. Ayrıca, bazı modellerde eksik olan bilgi panelleri eklenerek kullanıcı deneyimi daha bilgilendirici hale getirilebilir. Bunun yanı sıra, kullanıcı etkileşimini daha da artırmak amacıyla gelişmiş VR donanımları, özellikle el kontrol kumandaları ve dokunsal geri bildirim (haptic feedback) teknolojileri ile entegrasyon sağlanabilir. Bu tür geliştirmeler, VR tabanlı müze turu uygulamalarının gelecekte daha geniş bir kullanıcı kitlesine hitap etmesine ve kültürel mirasın dijital ortamda daha etkili bir şekilde sunulmasına katkı sağlayacaktır.

Katkı Oran Beyanı

Yazarların katkı yüzdesi aşağıda verilmiştir. Tüm yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	D.Y.	S.H.	S.D.
K	20	40	40
T	35	30	35
Y	40	10	50
VTI	30	35	35
VAY	30	35	35
KT	25	40	35
YZ	20	50	30
KI	40	20	40
GR	45	20	35
PY	30	15	55
FA	35	30	35

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

Aggarwal R, Singhal A. 2019. Augmented Reality and its effect on our life. 9th International Conference on Cloud Computing, Data Science and Engineering, 10-11 January, Noida, India, pp: 510-515.

Akdaş D, Çalgüner A. 2021. Virtual reality in product design: Researches between 1997 and 2021. Gazi Univ J Sci, 9(4): 371-391.

Andrews C, Southworth MK, Silva JNA, Silva JR. 2019. extended reality in medical practice. Curr Treat Options Cardiovasc Med, 21(4): 18.

Anonymous. 2005. Shinecon discovery & innovation. URL: https://www.shinecon.com/ (accessed date: 10 April 2024).

Anonymous. 2009. Unity blog. Unity technologies. URL: https://blog.unity.com/ (accessed date: 4 April 2024).

Anonymous. 1995. Wonder 360: Experience the Renwick gallery exhibition in virtual reality. Smithson. Am. Art Mus. URL:

https://americanart.si.edu/wonder360 (accessed date: 25 March 2024).

Boyraz G, Kırcı P. 2019. Unity 3D oyun yapma simülatörü ile 3D oyun tasarimi. Int J Multidiscip Stud Innov Technol, 3(2): 225-229.

Carmigniani J, Furth B. 2011. Augmented reality: An overview. In: Furth B, ed. Handb. Augmented Reality. Springer, New York, USA, pp: 3-46.

Claudio P, Maddalena P. 2014. Overview: virtual reality in medicine. Virtual Reality Med, 7(1): 353-401.

Costanza E, Kunz A, Fjeld M. 2009. Mixed Reality: A Survey. In: Lalanne D, Kohlas J, eds. Hum. Mach. Interact. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, pp: 47-68.

Çorak M. 2019. Canlandırma sinemasinda kullanilan autodesk 3ds max programinda cat yaziliminin sinirliliklari ve temel prensiplere ilişkin çözüm üretme. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, ss: 68.

Desender LM, Van Herzelee I, Aggarwal A, Vermassen FE, Cheshire NJ. 2011. Training with simulation versus operative room attendance. J Cardiovasc Surg, 52(1): 17-37.

Geszten D, Hámornik BP, Hercegfi K, Szabó B, Young A. 2015. Qualitative analysis of user experience in a 3D virtual environment. Proc Assoc Inf Sci Technol, 52(1): 1-4.

Górski F, Buń P, Wichniarek R, Zawadzki P, Hamrol A. 2016. Effective design of educational virtual reality applications for medicine using knowledge-engineering techniques. EURASIA J Math Sci Technol Educ, 13(2): 395-416.

Gutiérrez MAA, Vexo F, Thalmann D. 2008. Stepping into virtual reality. Springer, London, UK, 1st ed., pp: 65.

Hale KS, Stanney KM. 2014. Handb. virtual environ. Des., Implement., Appl. Florida, USA, 2nd ed., pp: 158.

Han DID, Weber J, Bastiaansen M, Mitas O, Lub X. 2019. Virtual and augmented reality technologies to enhance the visitor experience in cultural tourism. In: tom Dieck M. C, Jung T, eds. Augmented Reality and Virtual Reality. Springer, London, UK, pp: 113-128.

Jung T, tom Dieck MC, Lee H, Chung N. 2016. Effects of virtual reality and augmented reality on visitor experiences in museum. In: Inversini A, Schegg R, eds. Inf Commun Technol Tour, Springer, Bilbao, Spain, pp: 621-635.

Kamińska D, Sapiński T, Wiak S, Tikk T, Haamer R, Avots E, Helmi A, Ozcinar C, Anbarjafari G. 2019. Virtual reality and its applications in education: survey. Inf, 10(10): 318.

Kudver D. 2022. Müze ziyaretlerinde sanal gerçeklik deneyiminin sanal gerçeklik sonrası turizm müşterilerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Yaşar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İzmir, Bornova, Türkiye, ss: 102.

Lee H, Jung TH, tom Dieck MC, Chung N. 2020. Experiencing immersive virtual reality in museums. Inf Manage, 57(5): 103229.

Mabrey JD, Reinig KD, Cannon DW. 2010. Virtual reality in ortopaedics: is it a reality? Clin Orthop Relat Res, 468(10): 2586-2591.

Marín-Morales J, Llinares C, Guixeres J, Alcañiz M. 2020. Emotion recognition in immersive virtual reality: from statistics to affective computing. Sensors, 20(18): 5163.

Ntakasis G, Plomariti C, Frantzidis C, Antoniou PE, Bamidis PD, Tsoulfas G. 2023. Exploring the use of virtual reality in surgical education. World J Transplant, 13(2): 36-43.

Pallud J, Straub DW. 2014. Effective website design for experience-influenced environments. The case of high culture museums. Inf Manage, 51(3): 359-373.

Pedro A, Le Q. T, Park C. S. 2016. framework for integrating safety into construction methods education through interactive virtual reality. J Eng Educ Pract, 142(2): 04015011.

Raja D. 2019. Virtual reality - opportunities and challenges. Int J Res Appl Sci Eng Technol, 7(4): 1765-1774.

Samarasinghe DAS, Latif SA, Baghaei N. 2019. Virtual reality models for promoting learners engagement in construction studies. 2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON): 08-11 April, Dubai, UAE, pp: 1331-1335.

Schultheis MT, Rizzo AA. 2001. The application of virtual reality technology rehabilitation. Rehabil Psychol, 46(3): 296-311.

Sirror H, Abdelsattar A, Dwidar S, Derbali A. 2021. A review on virtual reality for architecture education. 11th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 7-11 March, Singapore, pp: 944-950.

Southall H, Marmion M, Davies A. 2019. Adapting Jake Knapp's design sprint approach for ar/vr applications in digital heritage. In: tom Dieck M. C, Jung T, eds. Augmented Reality and Virtual Reality. Springer Cham, Bern, Switzerland, pp: 59-70.

Tom Dieck MC, Jung T, Michopoulou E. 2019. Experiencing virtual reality in heritage attractions: perceptions of elderly users. In: tom Dieck M. C, Jung T, eds. Augmented Reality and Virtual Reality. Springer Cham, Bern, Switzerland, pp: 89-98.

Valdez MT, Ferreira CM, Martins MJM, Barbosa FPM. 2015. 3D virtual reality experiments to promote electrical engineering education. 2015 International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET), 11-13 June, Lisbon, Portugal, pp: 1-4.

Wickens CD. 1992. Virtual reality and education. 1992 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 18-21 October, Chicago, IL, USA, pp: 842-847.

Yağmurlu K. 2017. Makine tasarımında 3ds Max programının kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, Türkiye, ss: 94.

Young B, Ellobody E, Hu T. 2012. 3D visualization of structures using finite-element analysis in teaching. J Prof Issues Eng Educ Pract, 138(2): 131-138.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1629732

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 650-659 / May 2025

IDENTIFICATION AND SIMULATION OF FIRE AND EXPLOSION HAZARDS USING HAZOP AND ALOHA, CASE STUDY: THE IGNITION SYSTEM OF A POWER PLANT

Nafiseh FARAJIRAD[1]*, Müge ENSARİ ÖZAY[1]

[1]*Uskudar University, Faculty of Health Sciences, Occupational Health and Safety Department, 34662, Istanbul, Türkiye*

Abstract: A power plant is widely recognized as a high-risk industrial environment due to the complex processes and potential exposure to hazardous materials, high temperatures, and powerful machinery. In the meantime, identifying fire and explosion hazards is vital to preventing catastrophic incidents, safeguarding lives and assets, and ensuring the safe, compliant operation of process plants. This study investigates fire and explosion hazards associated with the ignition system of a power plant situated in northern Iran. Hazard identification was performed using the HAZOP technique, while risk levels were assessed and prioritized through a Decision Matrix Risk Assessment (DMRA). To visualize the severity of potential hazards, the ALOHA software was employed for consequence modeling. The most important identified risk was a temperature deviation failure in the control system of the vaporizer burner. Installing a temperature indicator on the vaporizer outlet line is recommended to assist operators and supervisors in detecting and preventing such deviation and its potential consequences. The results of ALOHA indicate that the resulting explosion and radiation levels, along with potential domino effects, pose a significant threat to human life.

Keywords: ALOHA, HAZOP, Ignition system, Powerplant

***Corresponding author:** Uskudar University, Faculty of Health Sciences, Occupational Health and Safety Department, 34662, Istanbul, Türkiye
E mail: n_farajirad@yahooo.com (N. FARAJIRAD)
Nafiseh FARAJIRAD https://orcid.org/0000-0002-1137-0600
Müge ENSARİ ÖZAY https://orcid.org/0000-0002-4785-5503

Received: January 30, 2025
Accepted: March 15, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Farajirad N, Ensari Özay M. 2025. Identification and simulation of fire and explosion hazards using HAZOP and ALOHA, case study: the ignition system of a power plant. BSJ Eng Sci, 8(3): 650-659.

1. Introduction

A power plant is an arrangement of systems and subsystems that produce electricity (Raja et al., 2006). Most power plants utilize one or more generators to convert mechanical energy into electrical energy. Power stations are of significant importance in fulfilling the increasing need for electricity. The various techniques utilized by power generation facilities, such as thermal, hydroelectric, nuclear, and sustainable energy methodologies, play a role in ensuring the accessibility of electricity for residential, commercial, and industrial purposes. The majority of power facilities globally rely on the combustion of fossil fuels like coal, oil, and natural gas for the production of electrical energy (Alsaffar and Ezzat, 2020).

Natural gas power plants create electricity by using natural gas as a fuel. There are various types of natural gas power plants that produce electricity yet serve different objectives. All natural gas plants employ a gas turbine, natural gas is combined with a stream of air, which combusts and expands through the turbine, causing a generator to spin a magnet, producing electricity. Power stations are intricate settings that contain high-voltage machinery, combustible substances, and dangerous chemicals. An instantaneous deviation from safety procedures or malfunction of equipment can lead to severe outcomes, including casualties, fatalities, and substantial harm to infrastructure.in result a power plant considered as a high-risk workplace, requiring safe working procedures due to the nature of the operations and employment.

The safety of natural gas power generation has become a critical component of city public safety. Therefore, this workplace is prone to potential accidents due to the stringent operating procedures of the power plant. The outcome may have an influence on the residents around the Power Plant and societal stability. It even can result in major accidents, deaths and wounds (Shao and Duan, 2012). Despite the enhanced safety measures in power plants compared to previous years, employees in these facilities continue to face various risks.so it is necessary to devise a strategy that includes the identification and evaluation of major risks in order to complete the necessary steps in determining and implementing risk identification elements during plant operation (Sinpong, 2015). According to the International Labor Organization (ILO), there are 3 million workplace deaths annually. This means that every day, 8,219 workers die due to accidents or work-related diseases. (ILO, 2023). Furthermore, according to the OECD (2008), over 2,500 fatalities occur annually in energy-related plants as a result of severe

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

accidents (OECD, 2008). This figure seems to be increasing annually in correlation with the growing demand for energy consumption. Given the hazardous nature of power plant workplaces, companies are required to ensure safe working conditions by implementing systematic and regular processes for hazard identification and risk assessment (Ahmad et al., 2016). Fire and Explosion are the most predominant incidents occurring in chemical and process industries, potentially resulting in significant property damage and production losses. It is widely acknowledged that fire and explosion hazards rank as the primary and secondary major hazards within the chemical sector (Ahmadi and Galenovi, 2011). Fire is the most prevalent, but explosions are more damaging, typically resulting in fatalities and property damage (Khan and Abbasi, 2001). Fire can result in human fatalities, major injuries, financial losses due to equipment damage and disruption of productive activity, job loss, and possibly irreversible environmental damage, as well as increased insurance premiums. Fire safety within power plant operations is of utmost importance owing to the existence of extremely flammable substances and the risk of electrical sparks. In order to reduce the likelihood of fires, power plants are required to follow rigorous safety procedures. Hence identifying risk factors and measures to prevent fire and explosion mishaps in these industries is critical (Etowa et al., 2002).

Identifying hazard is critical for the safe design and operation of systems in process plants and other facilities. There are several approaches for identifying hazardous circumstances, all of which must be rigorously, thoroughly, and systematically applied by a multidisciplinary team of professionals. Success is determined by first identifying and then analyzing potential scenarios that could result in accidents of varying severity. Without a structured identification system, risks can be overlooked, resulting in incomplete risk assessments and eventual loss. Risk assessment is crucial, encompassing stages such as hazard identification, analysis, and risk evaluation. Various simulation programs are also utilized to assess the potential effects of hazards. Hazard and Operability Analysis (HAZOP) is widely recognized as a preferred technique for identifying hazards and ranking risks in hazardous facilities (Djapan et al., 2018). The HAZOP technique is a cornerstone in process safety review methodologies for effective risk management. Experience has demonstrated its efficacy in identifying hazards and critical control points, prioritizing them for effective control measures. The identification of hazards through HAZOP allows for a systematic assessment and critique of the process. Therefore, these techniques can be considered effective for recognizing and predicting hazards, potentially increasing safety levels, preventing accidents, and enhancing system reliability by minimizing operational issues. Conversely, prioritizing risks can enable managers to take action to reduce or eliminate the most pressing risk factors, thereby safeguarding workers' health through the implementation of crucial safety measures. Through HAZOP analysis, operators can efficiently locate essential documents to address abnormal situations (Alaei et al., 2014). On the other hand, decision matrix risk assessment (DMRA) is a systematic and widely used approach for risk estimation that entails assessing and categorizing risks based on informed judgements about probability, consequence, and relative importance (Reniers et al., 2005). In the same direction the use of software such as Areal Location of Hazardous Atmosphere (ALOHA), PHAST, FLASC is increasing day by day in order to determine the impact distances of VCE explosions and toxic dispersion. ALOHA is a software program specifically developed for modeling toxic hazards resulting from chemical releases, thermal radiation emitted by chemical fires, and scenarios involving vapor explosions, as part of risk assessments for both human safety and environmental impact (Ilic et al., 2018).

2. Materials and Methods

2.1. Case Study

The study has conducted at a power plant in northern Iran. The plant consists of six gas units each with a capacity of 159 MW at ISO conditions and the output of Power Plant is almost 6,491,255 MW per hour in the year.

The power plant under study comprises various process units and facilities, including the fuel oil system, natural gas system, ignition liquid gas system, hydraulic oil system, and gas turbine with drainage gas. Natural gas, fuel gas, and fuel oil are the primary chemical materials stored and utilized in these facilities, serving as fuel for turbine units to generate electrical energy.

2.2. Ignition System Unit Description

Ignition gas is used at gas turbine start-up to produce flames and thus igniting the main fuel. The natural gas system supplies the flow of natural gas required for formation of ignition flames taken from the main fuel gas supply line at GT skid. The ignition gas used for fuel oil start-up is propane (or a mixture of propane and butane). The main parts of the ignition systems are a tank, two vaporizers and pipes are given in Figure 1.

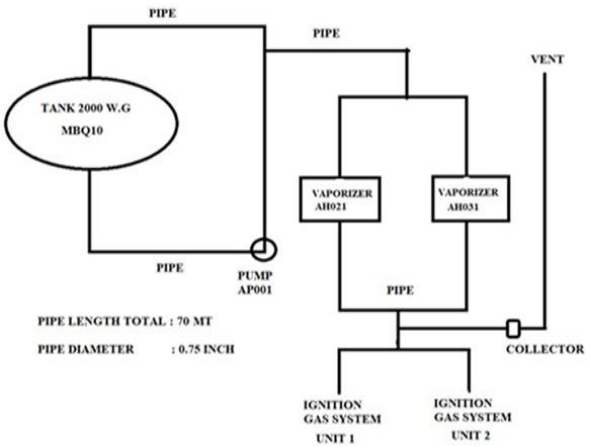


Figure 1. Ignition system.

The ignition gas system supplies the flow of ignition gas required for formation of ignition flames. Each burner is provided with an ignition gas burner and spark plug. The ignition gas system supplies the ignition gas burners with ignition gas at the proper time to produce the ignition flames. Vaporizers are utilized to increase the temperature of liquefied propane or butane, changing its phase from liquid to gas. These devices are engineered to handle substantial quantities of liquid petroleum gas and convert it into vaporized gas consistently, maintaining a steady flow rate and pressure ranging from hundreds to thousands of gallons per hour. When gas oil is used as main fuel, the ignition gas is taken from the propane tank. This storage tank has a capacity of 500 W.G., contains liquid gas in relation of 40% Propane 60% Butane. The pump has the task to transfer liquid gas from the tank to the vaporizers that transfer the required thermal input to the liquid gas in order to have it in gas phase. Regarding the protection of the Ignition system, it is necessary to mention that according to the design the system has equipment such as safety valves, pressure transmitters, etc. that perform the task of controlling the operation of the ignition system.

2.3. Hazard and Operability Analysis (HAZOP)

HAZOP is recognized as one of the most effective and rigorously structured techniques for identifying hazards in the chemical industrials. It is widely employed across process industries to pinpoint potential hazards and operational challenges. The widespread implementation of HAZOP across various fields underscores its reputation as a powerful technique for enhancing diverse systems (Marhavilas et al., 2019).

HAZOP is a very effective method for identifying process-related hazards and ensuring the implementation of effective control measures to protect systems or existing facilities. HAZOP study involves a systematic examination of a system, process, or operation with comprehensive design information, conducted by a multidisciplinary team. It is among the most extensively employed methods for identifying hazards in the chemical industries. This is achieved by employing a set of guidewords along with system parameters to identify significant deviations from the intended design. When a deviation is detected, the team assesses its consequences using their experience and judgment. If a cause can be identified for a deviation, the team then analyzes its effects or consequences. They assess whether existing protective systems or safeguards mitigate the risk to an acceptable level. If not, or if there's uncertainty in any part of the analysis, the team documents a recommendation for action, including a reference number, parameter, guideword, cause, and details of protective systems, Conversely, the HAZOP study can serve as a valuable tool to provide maintenance and inspection staff with a prioritized list of tasks and areas of focus (Crawley and Tyler,2015).

2.4. Decision Matrix Risk Assessment (DMRA)

Risk is determined by the probability of an event (such as a specific hazard occurring) and the potential consequences if that event does occur. Qualitative risk assessment (QRA) is a method employed to evaluate the risks associated with specific hazards. It is utilized for events that are uncertain and could potentially lead to significant consequences. Qualitative assessments are regarded as effective for evaluating relative levels when comparing or examining multiple alternatives, especially when precise data or estimates of outcomes are unavailable (Musyafa and Adiyagsa, 2012). Quantitative data on reliability is often unavailable for specific installations, leading to greater reliance on qualitative assessments. The risk assessment matrix is utilized to rank risks according to their type and probability of occurrence. This approach helps assign risk assessment values based on the severity of potential consequences and the likelihood of those consequences occurring. This classification value is often associated with various types of risks, guiding decision-makers to accurately understand the risk level.so employing an appropriate risk assessment tool helps in determining the necessary time and cost to mitigate risks to an acceptable level. The risk matrix is utilized for hazard classification and calculating the Risk Priority Number (RPN), represented by the following equation 1:

$$RPN = Severity * Likelihood \quad (1)$$

where, severity is seriousness of the most probable consequence of a particular hazard occurrence and likelihood is probability of the most likely consequence occurring in the event of a hazard occurrence.

The initial risk-ranking matrix incorporates severity rankings and frequency rankings to enable a qualitative assessment of the consequences associated with each hazard. This matrix facilitates the screening of each identified hazard, assigning rankings and recommending appropriate measures to eliminate or mitigate hazards that are ranked as high priority. Table 1 and Table 2 display the severity of consequences and the likelihood of events used to rank the hazards identified in the conducted HAZOP Study. Table 3 illustrates how the relationship between severity and likelihood rankings is utilized to assign risk rankings to each hazard. It also includes the definitions of risk ranks used in ranking the hazards identified in the HAZOP Study. Table 4 shows the criteria for prioritizing identified risks.

2.5. Areal Location of Hazardous Atmosphere (ALOHA)

ALOHA is a widely utilized hazard modeling program designed for chemical emergency planning and response. ALOHA enables users to input details regarding an actual or potential chemical release and subsequently generates threat zone estimates for various hazard types. The program can model toxic gas clouds, flammable gas clouds, Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions (BLEVEs), jet fires, pool fires, and vapor cloud explosions. (EPA, 2016).

Table 1. Severity category

	Public	Worker	Property
A	Major release of AHM*	Loss of life	Major fire or explosion and/or loss of production
B	Moderate release of AHM	Severe injury or disability	Moderate fire or explosion and/or loss of production
C	Small release or AHM	Loss time injury but no disability	Small equipment damage or loss of production
D	Very small release of AHM with no significant impact	First aid injury but no disability	Minor equipment damage or minor loss of production
E	No hazard	Not a significant hazard	Not a significant hazard

*AHM: Acutely hazardous material

Table 2. Likelihood category

1	Likely	Occurrence as often as once in an operating year in any similar plant
2	May occur	Frequency between once a year and once in 10 operating years or at least once in 10 similar plants operated for 1 year
3	Not likely	Frequency between once in 10 years and once in 30 operating years or at least once in 30 similar plants operated for 1 year
4	Very unlikely	Frequency of less than once in 30 year or less than once a year in 30 similar plants operated for 1 year
5	Not probable	Not probable

Table 3. Risk Ranking matrix

	1	2	3	4	5
A	1	1	2	3	NP
B	1	2	3	4	NP
C	2	3	4	4	NP
D	4	4	4	4	NP
E	NH	NH	NH	NH	NH

NH= No hazard, NP= Not probable

Depending on the scenario, different results can be obtained by selecting three different sources of leakage or explosion, direct, tank or pipe. The contact of the leak with a source of fire is present in the selection system. This situation makes the possible results of the scenario more realistic. The domains resulting from the scenario can interact with the area where the event occurred by using google earth or MARPLOT programs. In this study, as a result of the HAZOP analysis, the hazard that could cause explosion was selected as "possible excessive temperature in the vaporizer and possible vaporizer breakage leading to fire/ explosion", and the explosion modelled with Aloha for this deviation.

Table 4. Risk decision criteria

	Risk Rank	Recommendation
1	Unacceptable	Should be mitigated to risk rank 3 or lower as soon as possible
2	Undesirable	Should be mitigated to risk rank 3 or lower within reasonable period
3	Acceptable with Controls	Verify that procedures, controls, and safeguards are in place
4	Acceptable as is	No action is necessary

The assumptions taken into account during the study, the state of contact with the emission type fire source and the state of not having been taken into consideration. While the possible scenario as a result of contact with the fire source is divided into three groups (toxic area, flammable area and explosion area), only toxic dispersion modeling has been performed in the absence of contact with the fire source. In each scenario, constant wind speed and prevailing wind conditions were assumed. Gas compositions observed for each unit were based on their specific process conditions. However, the report only accounted for propane gas due to the gas detector's capability of detecting propane gas specifically, rather than mixed gases.

3. Results

3.1. DMRA and HAZOP Results

Table 5 illustrates the number of identified risks associated with the ignition system used in the operation of gas turbines and generators within the gas power plant. As shown in Table.5, 13 hazard has identified from

different deviations in level, temperature, pressure and flow. Two of the risks were in unacceptable zone that means should be mitigated to acceptable risk zone as soon as possible. Three of the identified risks were in undesirable zone and should be mitigated to acceptable or lower within reasonable period. Four of the risks are identified in green zone that mean they are acceptable with controls. Four risks in rank are acceptable according the organization risk matrix. After assessment the identified risk from HAZOP study, the significant risk with important consequences had chosen. According to the findings we can note that the most critical risks were presented by the formation of high and low temperature. High temperature may result **in** possible over-temperature in vaporizer, possible rupture of vaporizer and leading to fire or explosion and if low temperature happen may lead to less ignition gas supplied to burners and delayed operation and failure of generator turbine (GT) startup that will cause loss of production.

Table 5. The number of identified risks

Deviation	No. of Hazards	Risk rank			
		1	2	3	4
Level	3		1	1	1
Temperature	2	2			
Pressure	2		2		
Flow	6			3	3
Total	13	2	3	4	4

The undesirable risks were presented by failure in hardware because of failure of pressure regulator during operation and Lower/ No Level in result of level indicator failure on tank. This risk may occur during maintenance and inspection activities. For these scenarios, protection and preventive measures are recommended, as detailed in Table 6.

Table 6. Final result of HAZOP study

Deviation		Cause	Consequences	S	Safeguard	L	R
1	Hardware Failure	Failure of pressure regulator during operation	Hot compressed air into pressure regulator. Possible Personnel injury due to hot surface. Increased temperature of solenoid valve above the design value	B	Operator inspection. Operator training and procedure.	2	2
2	Hardware Failure	Failure of pressure regulator during operation	Leakage of gas to compressor and combustion chamber. Potential fire/explosion	B	Operator inspection. Operator training and procedure.	2	2
3	Higher Temperature	Control system of vaporizer burner failure	Possible over-temperature in vaporizer possible rupture of vaporizer leading to fire / explosion	B	Operator inspection	2	1
4	Lower Temperature	Direct fire in vaporizer failure	Less ignition gas supplied to burners. Delayed operation. Failure of GT startup. Loss of production	B	Operator training and education. Flame monitors on burners (UV)	1	1
5	Lower/ No Level	LI on tank failure	No supply of fuel oil to GT units Possible GT fails to start	B	Flame indicator Operator standby	2	2

3.2. ALOHA Results

Simulation and analysis of possible accident results were made using ALOHA® version 5.4.7. ALOHA.

The study was conducted for a power plant located in Mashhad, Iran. The power plant is of the unsheltered double stored type. The fuel mixture used in the power plant is 40/70 propane/butane. According to the results of HAZOP and DMRA, the most important deviation is simulated by ALOHA. The scenario is modelled based on failure of zone control system in vaporizer burner, which is explained in Table 6 as deviation number three. Explosion caused by the propane/butane mixture delivered through the pipes are not simulated. Since the ALOHA program just able to simulate single chemical compound scenario, the analysis should be performed for propane. Chemical values of propane with Cas number 74-98-6 and molecular weight 44.10 g/mol and site information are given in Table 7.

Table 7. Site information and chemical data

Location	Mashhad, Iran
Building Air Exchanges Per Hour	2.03 (unsheltered double storied)
Time	May 15, 2021 13:56 hours ST (using computer's clock)
Chemical Name	Propane
CAS Number	74-98-6
Molecular Weight	44.10 g/mol
AEGL-1 (60 min)	5500 ppm
AEGL-2 (60 min)	17000 ppm
AEGL-3 (60 min)	33000 ppm
IDLH	2100 ppm
LEL	21000 ppm
UEL	95000 ppm
Ambient Boiling Point:	-44.7° C
Wind	21 meters/second from SE at 10 meters
Ground Roughness	open country
Air Temperature	29° C
Cloud Cover	5 tenths
Stability Class	D
Inversion	No Inversion
Relative Humidity	22%

ALOHA requires information about the prevailing weather conditions under which the simulation will be conducted. Therefore, the weather conditions entered the simulation are briefly as follows: wind speed is 21 m/sec blowing from the south-west direction. The ambient temperature is 29oC, there is no inversion, the humidity is 22% and the stability class is D. The lower explosive limit of Propane, which is predefined in the ALOHA, is 21000 ppm and the upper explosion limit is 95000 ppm. The defined scenario and results are described as follows: Propane is in gas form at the specified values and all the gas transmitted in the pipes was simulated by considering it as propane. The amount of radiation emitted by the burning gas is shown in Figure 2a. While the effective distance of the radiation was lethal for living creatures at 50 meters in the direction of the wind, it was observed that the radiation level decreased as the distance increased and disappeared at 90 meters.

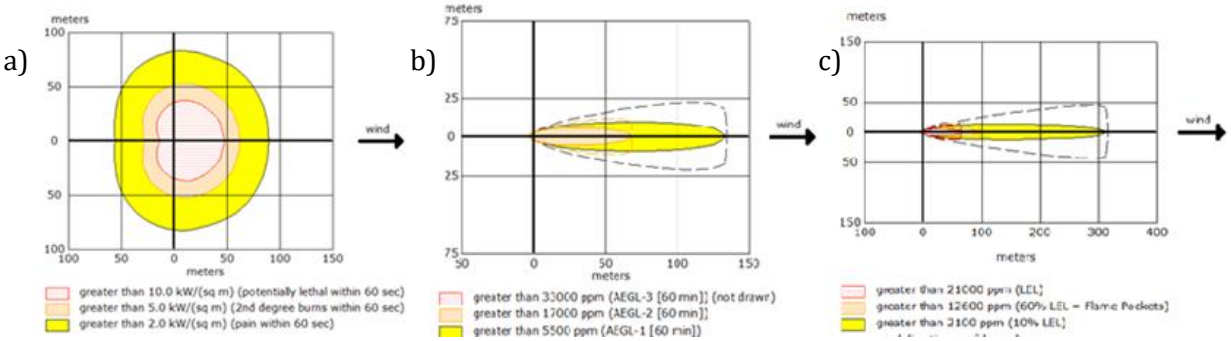


Figure 2. a) Thermal radiation threat, b) Toxic area, c) Flammable area.

The potential danger from not burning the gas coming out of the pipeline can result in three situations as toxic area vapor cloud, flammable area vapor cloud, blast area vapor cloud as shown in Figure 2b and Figure 2c. If the gas escaping from the pipeline connected to the evaporator does not come into contact with an igniter source, the gas cloud is toxic. The effective range of the toxic vapor cloud is observed that the toxicity in the environment reaches 33000 ppm, it exceeds the distance of 50 meters in the first 60 minutes, and the toxicity decreases as the distance increases, and there is no toxic cloud effect at a distance of 150 meters. Flammable areas may occur even if the concentration is below the lower flammability level (LEL). At 21,000 ppm, where the Lower Explosive Limit (LEL) is at its peak, the flammability is also at its highest. The explosion caused by the combustion of flammable vapor or gas generates considerable overpressure. Therefore, contact with the fire source at 100 meters will cause vapor cloud explosion and the impact area will reach the highest level. This domain is shown in Figure 3a. While structures within an area of approximately 70m are damaged by a pressure above 3.5 psi, it results in serious injuries to people. The blast area is displayed on Google Earth in Figure 3b.

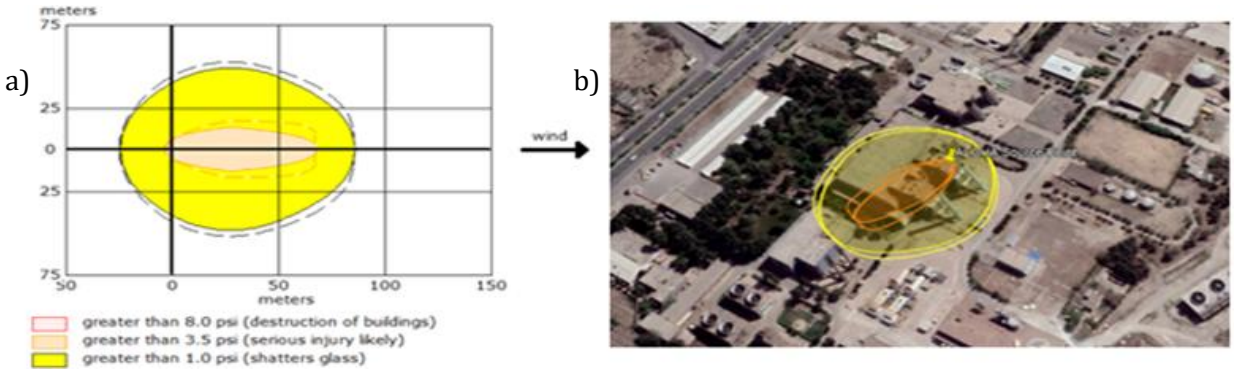


Figure 3. a) Thermal radiation threat, b) Blast area from Google earth view.

4. Discussion

(Sánchez Colmenarejo et al., 2022) mentioned that recognizing hazards and assessing risks are crucial elements in ensuring the safety of industries including power plants. Their research presents a unique risk analysis approach that enhances safety during commissioning and start-up operations and also provides an overview of the processes and procedures involved in power plant construction, in comparison to those used in other industrial sectors. A systematic review of the scientific literature was conducted to understand the current state of risk assessment and hazard identification methods used in power plant construction projects. The results indicate that HAZOP is a commonly used method for identifying hazards and risks in power plants and it highlights how a major disruption occurred in the past 15 years, following the widespread implementation of the HAZOP technique during project execution. Over the past 20 years, more than 2,500 articles have referenced HAZOP analyses, establishing it as the most widely used PHA methodology and a cornerstone of process safety and management programs (Hoorelbeke, 2021). Ensuring safety is a key priority in the chemical industry, (Mocellin et al., 2022) stated that HAZOP explores the consequences of deviations from design conditions and enables researchers to thoroughly understand the nature and scope of potential hazards in research activities and experiments, ultimately helping to reduce risks to an acceptable level.

The study by (Penelas and Pires, 2021) demonstrated the effectiveness of the HAZOP methodology in identifying potential hazards and assessing the risks associated with equipment malfunctions and property damage. It highlighted HAZOP as a valuable tool for evaluating impacts on both new and existing process facilities while providing crucial insights for company leaders, decision-makers, and operations managers. They implemented the HAZOP methodology in process and safety operations within the oil production industry. By dividing a crude oil production unit into smaller sections for analysis, they identified 71 potential risks.

The analysis of 242 tank accidents in industrial facilities over the past four decades revealed that fire emerged as the predominant cause of loss, with 145 occurrences. Furthermore, explosion was identified as the second most common type of loss, with 61 reported incidents. Collectively, fire and explosion constituted the majority, encompassing 85% of the total cases (Chang and Lin, 2006). Alsaffar and Ezzat (2020) investigated operational risks in combined cycle power plants using hazard identification techniques. The study focused on potential risks associated with the normal operation of boilers, gas and steam turbines, generator systems, and gas inventory systems in a typical combined cycle power plant. The findings revealed that the most probable consequences of the identified hazards and risks are fire and explosion.

Given that the most significant consequences of risks associated with large industries are fires and explosions, this study specifically concentrates on these hazards.

(Ahmad et al., 2016) conducted an investigation into work-related accidents at power plants using the HIRARC (Hazard Identification, Risk Assessment, and Risk Control) process. Data were collected from two coal-fired power plants in Malaysia. The study identified five hazards at the power plants, none of which were classified as high risk. However, the root cause of all the identified hazards was attributed to human factors. The conducted study explicitly highlights the significant role of the human factor in the occurrence of accidents.

(Kumar and Bhattacharya, 2015), using a method similar to ours, conducted a HAZOP study for a vaporizer in an ammonia storage yard and proposed modifications for automating the water supply to the vaporizer. They considered different release scenarios for both vapor and liquid leaks based on various orientations of the storage bullet, simulating hazardous chemical releases using ALOHA and PHAST software.

(Iskender, 2020) conducted a study to identify the hazards associated with a stainless-steel spherical tank containing pure acetone. The study applied HAZOP to identify potential hazards and used ALOHA to simulate the consequences as well.

(Ilic et al., 2018) analyzed the environmental and human health impacts of a chlorine gas leak, modeling the release of 3.373 tons of chlorine gas over one hour using ALOHA software. (Rodrigues et al., 2017) used ALOHA software simulations to identify and quantify the potential physical effects and explosion damages in three routes of the diesel

hydro-treatment unit at the Abreu e Lima Refinery. The application of ALOHA not only aids in identifying risks within the refining process but also facilitates process management and enhances control over critical areas requiring heightened safety measures.

(Hung et al., 2024) emphasized the critical importance of ensuring firefighter safety during oil tank fires, given the considerable risks associated with thermal radiation. Their research employed the Fire Dynamics Simulator (FDS) and ALOHA software to model a severe oil tank fire scenario at the Zhushan Branch Power Plant, which houses two heavy oil tanks and several light oil tanks. The study highlights the significance of integrating FDS and ALOHA outputs to devise a balanced and adaptive strategy for firefighter safety, thereby optimizing response protocols in high-risk environments. The findings offer crucial insights for defining safety zones, enhancing fire protection and emergency response standards, and informing strategy development for large-scale oil and petrochemical storage facilities.

5. Conclusion

Power plants play a crucial role in generating the energy that supports societies. Prioritizing safety measures in power plants is essential to ensure the welfare of workers, reduce the occurrence of accidents, and mitigate environmental consequences.

Considered as a whole, most of the previous HAZOP studies were focused on chemical process and the studied-on power plant almost focused on identify fuel tanks hazards, hence, this study attempts to identify the specific hazard related to ignition system of power plant as an important part of operation. Accidents in this area have the potential to cause multiple injuries and fatalities both on-site and off-site, as well as significant damage to assets and long-term production losses.

This study used two techniques to evaluate and assess ignition system hazards in a gas power plant located in northern Iran. The HAZOP technique was employed to identify hazard scenarios that could lead to fire or explosion accidents, pinpointing their causes, locations, and recommended protective measures. A risk matrix was utilized to prioritize the identified risks. Additionally, to provide a clearer understanding of the severity of hazards, ALOHA software was employed to model, simulate, and predict the effects of fire and explosion hazards.

This modeling provides a visualization of the fire and explosion risks, facilitating safety decisions that are crucial for their mitigation. The findings from this study enabled us to propose control and preventive measures aimed at reducing and mitigating fire and explosion accidents.

Based on the findings, the ignition system fueled by gas presents a significant risk of fire and explosion.

The most significant identified risk is the failure of the vaporizer burner's control system due to temperature deviations. Installing a temperature indicator on the vaporizer outlet line can assist operators and supervisors in detecting and preventing such deviations and their potential consequences. Based on the simulation results, the explosion and radiation effects, along with the potential domino effect, pose significant risks that could lead to fatal consequences for human life.

Moreover, in the case of lower temperature deviation, installation of temperature indicator in vaporizer outlet line, provide electrical heat tracing and insulation on the pipeline from vaporizer to pressure regulator vale and provide vent line after pressure regulator valve will help to reduce the failure rate.

The inability of the ALOHA program to produce a result analysis for situations that may occur in cases where the chemical transmitted in the pipes is in liquid form, and this risk situation can be taken into account by using alternative programs such as PHAST or SAFETI computer modelling programs. In addition, the calculation of the mixture conveyed to the vaporizers by pipe will increase the reliability of the possible results.

Considering the high-risk operating conditions, combining the Fault Tree Analysis (FTA) and Event Tree Analysis (ETA) methods could enhance risk identification and lead to more accurate results in future studies.

The primary objectives of the study are to prioritize human safety, followed by the protection of the environment and facilities, while minimizing financial losses within the power plant under examination.

According to the study findings the importance of personnel's role as an important safeguard has cleared. Based on evidence, workers' behaviors influenced by safety training, processes, and programs have been recognized as significant factors contributing to job site accidents in recent years (Shine et al., 2015). So, it's necessary to enhance safety awareness among all workers. Training is of utmost importance in the realm of fire safety. It is imperative that employees working in power plants undergo thorough fire safety instruction, encompassing areas such as the prevention of fires, identification of potential fire hazards, correct utilization of fire extinguishers, and protocols for evacuations. By implementing comprehensive safety measures, conducting regular inspections, fostering a strong safety culture, prioritizing safety for a sustainable future, and providing ongoing training, power facilities can reduce incidents, protect employees, and ensure a reliable energy production.

Author Contributions

The percentages of the authors' contributions are presented below. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

	N.S.	M.E.O.
C	80	20
D	70	30
S	40	60
DCP	80	20
DAI	70	30
L	90	10
W	80	20
CR	50	50
SR	80	20
PM	80	20
FA	90	10

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans.

References

Ahmad AC, Mohzsin IN, Otman MK, Muhamad NH. 2016. A hazard identification risk assessment and risk control accidents at power plant. In: 4th International Building Control Conference (IBCC), July 13-17, Kuala Lumpur, Malaysia, pp: 54. https://doi.org/10.1051/matecconf/20166600105

Ahmadi S, Adl J, Ghalehnovi M. 2011. Relative ranking of fire and explosion in a petrochemical industry by fire and explosion index. J Qazvin Univ Med Sci, 14(4): 50-56.

Alaei R, Mansoori S, Moghaddam A, Mansoori M. 2014. Safety assessment approach of hazard and operability (HAZOP) for sulfur recovery unit Claus reaction furnace package; blower; heat exchanger equipment in South Pars gas processing plant. J Nat Gas Eng, 2: 271-284. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.07.007.

Alsaffar I, Ezzat A. 2020. Qualitative risk assessment of combined cycle power plant using hazards identification technique. J Mech Eng Res Dev, 43(2): 284-293.

Chang JS, Lin CC. 2006. A study of storage tank accidents. J Loss Prev Process Ind, 19(1): 51-59.

Crawley F, Tyler B. 2015. HAZOP: guide to best practice, guidelines to best practice for the process and chemical industries. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp: 322.

Djapan M, Macuzic I, Tadic D, Baldissone G. 2018. An innovative prognostic risk assessment tool for manufacturing sector based on the management of the human, organizational and technical/technological factors. Saf Sci, 119: 280-291. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.02.032.

EPA. 2016. Environmental protection agency, ALOHA Software. URL: https: //www.epa.gov/cameo/aloha-software (accessed date: September 17, 2023).

Etowa CB, Amyotte PB, Pegg MJ. 2002. Quantification of inherent safety aspects of the Dow indices. J Loss Prev Process Ind, 15(6): 477-487. https://doi.org/10.1016/S0950-4230(02)00039-6.

Hoorelbeke P. 2021. Process safety: an engineering discipline. De Gruyter, Berlin, Germany, pp: 240.

Hung MC, Lin CY, Hsiao GL. 2024. Safe firefighting distances using FDS and ALOHA for oil tank fires. Fire, 7(12): 445. https://doi.org/10.3390/fire7120445.

Ilic P, Ilic S, Stojanovic LB. 2018. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool-Aloha. Qual Life, 9(1-2): 38-45. https://doi.org/10.7251/QOL1801038I.

International Labor Organization (ILO). 2023. A call for safer and healthier working environments. https: //doi.org/10.54394/HQBQ8592.2023 (accessed date: September 17, 2023).

Iskender H. 2020. HAZOP and ALOHA analysis of acetone. In: 4th International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management (ISHAD), October 24-25, Bursa, Türkiye, pp: 68. doi: 10.33793/acperpro.03.02.30.

Khan F, Abbasi SA. 2001. Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequence. J Loss Prev Process Ind, 12(5): 361-378. https://doi.org/10.1016/S0950-4230(98)00062-X.

Kumar G, Bhattacharya R. 2015. Consequence analysis for simulation of hazardous chemicals release using ALOHA software. Int J Chemtech Res, 8(4): 2038-2046.

Marhavilas PK, Filippidis M, Koulinas GK, Koulouriotis DE. 2019. The integration of HAZOP study with risk-matrix and the analytical-hierarchy process for identifying critical control-points and prioritizing risks in industry - a case study. J Loss Prev Process Ind, 62: 103981. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103981.

Mocellin P, De Tommaso J, Vianello C, Maschio G, Saulnier-Bellemare T, Virla L, Patience GS. 2022. Experimental methods in chemical engineering: hazard and operability analysis-HAZOP. Can J Chem Eng, 100: 3450-3469. https://doi.org/10.1002/cjce.24520.

Musyafa A, Adiyagsa H. 2012. Hazard and operability study in boiler system of the steam power plant. Int J Sci Technol, 1(3): 1-10.

OECD. 2008. OECD Environmental outlook. OECD, Paris, France, pp: 218.

Penelas AJ, Pires JCM. 2021. HAZOP analysis in terms of safety operations processes for oil production units: a case study. Appl Sci, 11: 10210. https://doi.org/10.3390/app112110210.

Raja AK, Srivastava AP, Dwivedi M, 2006. Power plant engineering. New Age International Pvt Ltd Publishers, New Delhi, India, pp: 712.

Reniers G, Dullaert W, Ale B, Soudan K. 2005. The use of current risk analysis tools evaluated towards preventing external domino accidents. J Loss Prev Process Ind, 18: 119-126. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.03.001.

Rodrigues AJS, da Silva MHN, de Farias DO, Teixeira MM, de Brito Rocha MF, Lins GB, D'Emery RA, Júnior JFS, Correia Neto JSC. 2017. Risk reliability analysis, resulting from explosions in petrochemical industries: a case study using Aloha software. In: 12th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), June 21-24, Lisbon, Portugal, pp: 48. https://doi.org/10.23919/CISTI.2017.7975733.

Sánchez Colmenarejo JI, Camprubí FM, González-Gaya C, Sánchez-Lite A. 2022. Power plant construction projects risk assessment: a proposed method for temporary systems of

commissioning. Buildings, 12(8): 1260. https://doi.org/10.3390/buildings12081260.

Shao H, Duan G. 2012. Risk quantitative calculation and ALOHA simulation on the leakage accident of natural gas power plant. Procedia Eng, 45: 352-359. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.170.

Shin D, Gwak H, Lee D. 2015. Modeling the predictors of safety behavior in construction workers. J Occup Saf Ergon, 21: 298-311. https://doi.org/10.1080/10803548.2015.1085164.

Sinpong HH. 2015. Risk assessment on combined cycle power plant mechanical maintenance. MSc Thesis, University Technical Malaysia Melaka, Malacca, Malaysia, pp: 102.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1633685

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)
Cilt 8 - Sayı 3: 660-671 / Mayıs 2025
(Volume 8 - Issue 3: 660-671 / May 2025)

BÜTÜNLEŞİK AHP VE K-ORTALAMA KÜMELEME TABANLI YEDEK PARÇA TALEP TAHMİNİ: SAĞLIK EKİPMANLARI ALANINDA BİR UYGULAMA

Doğukan İlbey SÜSLÜ[1], Kumru Didem ATALAY[1]*, Tusan DERYA[1]

[1]*Başkent University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, 06730, Ankara, Türkiye*

Özet: Bu çalışmada, uluslararası pazarda manyetik rezonans cihazlarının yedek parça taleplerini daha doğru tahmin edebilmek için bütünleşik bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntem üç temel bileşenden oluşmaktadır: En önemli kriterin belirlenmesi için çok kriterli karar verme, benzer talep özelliklerine göre ülkelerin gruplandırılması için kümeleme ve her bir küme için talep tahmini yapmak amacıyla regresyon teknikleri kullanılmıştır. İlk olarak, Analitik Hiyerarşi Süreci ile yedek parça taleplerini etkileyen kriterlerin göreli ağırlıkları hesaplanmış ve en önemli kriter seçilmiştir. Daha sonra, K-ortalama kümeleme algoritması kullanılarak ülkeler bu kritere göre benzer taleplere sahip gruplara ayrılmıştır. Her bir küme için özelleştirilmiş regresyon modelleri oluşturularak talep tahminleri gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşım, özellikle yerel üretim tesisi bulunmayan ülkelerde yedek parça tedarik süreçlerinin iyileştirilmesini ve talep tahmin doğruluğunun artırılmasını sağlamaktadır. Çalışmanın bulguları, küme bazlı talep tahmini yaklaşımının stok yönetimi ve tedarik zinciri süreçlerinde verimliliği artırabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, geliştirilen model, sağlık sektöründe yüksek maliyetli manyetik rezonans cihazlarının bakım ve onarım süreçlerini iyileştirmekte ve yedek parça tedarik zincirinin daha etkin yönetilmesini sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Yedek parça talep tahmini, Analitik hiyerarşi süreci, K-ortalama kümeleme

Integrated Use of AHP and K-means Clustering Methods for Spare Part Demand Forecasting: An Application in Healthcare Equipment

Abstract: In this study, an integrated approach has been developed to improve the accuracy of spare parts demand forecasting for magnetic resonance imaging devices in the international market. The proposed method consists of three main components: multi-criteria decision-making to determine the most critical criterion, clustering to group countries based on similar demand characteristics, and regression techniques to forecast demand for each cluster. First, the Analytic Hierarchy Process is employed to calculate the relative weights of the criteria influencing spare parts demand, and the most significant criterion is selected. Then, the K-means clustering algorithm is applied to categorize countries into groups based on this criterion. Customized regression models are developed for each cluster to enhance demand forecasting accuracy. The proposed approach improves spare parts supply processes, particularly in countries without local manufacturing facilities, and enhances forecast accuracy. The findings indicate that a cluster-based demand forecasting approach can increase efficiency in inventory management and supply chain operations. In conclusion, the developed model contributes significantly to optimizing the maintenance and repair processes of high-cost magnetic resonance imaging devices in the healthcare sector and improving the management of the spare parts supply chain.

Keywords: Spare part demand forecasting, Analytic hierarchy process, K-means clustering

***Corresponding author:** Başkent University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, 06730, Ankara, Türkiye
E mail: katalay@baskent.edu.tr (K. D. ATALAY)
Doğukan İlbey SÜSLÜ https://orcid.org/0009-0004-8947-0953
Kumru Didem ATALAY https://orcid.org/0000-0002-9021-3565
Tusan DERYA https://orcid.org/0000-0002-2851-4463

Gönderi: 5 Şubat 2025 **Kabul:** 15 Mart 2025 **Yayınlanma:** 15 Mayıs 2025
Received: February 5, 2025 **Accepted:** March 15, 2025 **Published:** May 15, 2025

Cite as: Süslü Dİ, Atalay KD, Derya T. 2025. Integrated use of AHP and k-means clustering methods for spare part demand forecasting: An application in healthcare equipment. BSJ Eng Sci, 8(3): 660-671.

1. Giriş

Küresel sağlık sektörü, teknolojinin hızla gelişmesi ve sağlık hizmetlerine olan talebin artmasıyla birlikte önemli dönüşümler geçirmektedir. Bu dönüşümde, medikal cihazların en kritik unsurlardan biri olarak öne çıktığı söylenebilir. Özellikle manyetik rezonans görüntüleme (MRG) cihazları, hastaneler için yüksek maliyetli ancak bir o kadar da hayati öneme sahip ekipmanlardır. Bu cihazlar, genellikle uzun ömürlü ve bakım gerektiren ürünler olmalarına rağmen, yedek parça temini ve bakım yönetimi gibi operasyonel süreçlerin doğru yönetilmesi, cihazların çalışma sürekliliğini sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır (Porter ve Teisberg, 2006; Topol, 2019). Ancak, küresel pazar dinamiklerinin farklılık göstermesi, her bir ülkenin sağlık altyapısı, ekonomik düzeyleri ve demografik yapıları gibi değişkenlere bağlı olarak MRG cihazlarına olan talepler farklılaşmaktadır. Aynı zamanda bu cihazlarda oluşan arızalanmalar sonucunda cihazların kullanabilirliğini sağlamak ve devam ettirmek açısından gerekli olan süreçler de farklılık göstermektedir. Bu aşamada, yedek parça tedarikinde yaşanan zorluklar ve bakım süreçlerinin uzaması, sağlık sektöründeki işleyişi

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

doğrudan etkileyen ve ciddi operasyonel aksaklıklara yol açabilen unsurlar haline gelmiştir.

MRG cihazları üreten işletmelerin her ülkede fabrikalarının olmaması, tedarik zincirinde büyük sıkıntılara yol açmaktadır. Yedek parça temininde yaşanan bu zorluklar, tamir ve bakım süreçlerinin uzamasına sebep olmakta ve bu da hastanelerin ve sağlık kurumlarının kesintisiz sağlık hizmeti verme kapasitesini tehdit etmektedir. Cihazların arızalanması ve bakım gereksinimlerinin hızla karşılanamaması, hasta tedavi süreçlerinin aksamasına yol açabilir, bu da hem hasta güvenliğini hem de sağlık hizmetlerinin kalitesini olumsuz yönde etkiler. Sağlık sektörünün sürdürülebilirliğini sağlamak için, cihazların çalışma sürekliliği sağlanmalı ve bakım süreçleri zamanında tamamlanmalıdır.

MRG üretimi gerçekleştiremeyen ülkelerde, cihazın tedarik edilmesi farklı bir ülke tarafından karşılanmaktadır. Cihazın kullanımı esnasında meydana gelen arızalanmalar durumunda, yedek parça temini konusunda yaşanan sıkıntılar, stok yönetimi ve yedek parça stoku konusunda başka önemli operasyonel zorlukları beraberinde getirmektedir. Gereğinden fazla yedek parça stoku bulundurmak, sadece stok maliyetlerini artırmakla kalmaz, aynı zamanda parça yönetimini karmaşıklaştırabilir. Lojistik, depolama ve envanter yönetimi gibi unsurlar da bu süreçlere dahil olduğunda, gereksiz stoklar, işletmenin operasyonel verimliliğini düşürür ve nakit akışını olumsuz yönde etkiler. Bunun yanında, arızalanan parçaların sayısının ve türünün öngörüsünün yapılmaması sonucu oluşan fazla stok, parçaların zamanında tedarik edilmesi ve en iyi envanter seviyelerinin korunması için ciddi zorluklar yaratabilir (Chopra ve Meindl, 2020).

Bu bağlamda, onarım için ihtiyaç duyulan parçaların ileriye yönelik tahminlerinin yapılması, yedek parça tedarik zincirini daha etkin bir şekilde yönetebilmek için kritik öneme sahiptir. Tahminlerin yapılmadan önce tahmini etkileyen kriterlerin seçilmesi aşamasında Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniklerinin uygulanması ve bu kriterler doğrultusunda benzerlik gösteren ülkelerin birlikte değerlendirilmesine olanak sağlayan kümeleme algoritmaları ile birleştirilmesi daha doğru ve sağlam öngörülerin yapılmasına olanak sağlayacaktır. Küresel pazarda faaliyet gösteren firmaların karşılaştığı zorluklardan biri de, her ülkenin kendine özgü sağlık dinamiklerine ve ekonomik koşullarına dayalı olarak cihaz ve yedek parça taleplerini doğru bir şekilde öngörmektir (Porter ve Teisberg, 2006). Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) gibi ÇKKV yöntemleri, farklı kriterlerin göreli önemini belirlemek ve tahminlerin yapılması aşamasında etkili olduğu düşünülen en uygun kriter setini seçmek açısından güçlü bir araç sunmaktadır (Saaty, 1980). Aynı zamanda, K-ortalama kümeleme algoritması, verilerin doğasında bulunan benzerliklere dayalı olarak ülkelerin kümelenmesine olanak tanır. Bu kümeleme işlemi, ülkelerin belirli özelliklerine göre homojen gruplar oluşturulmasını sağlayarak, tahminlerin bu gruplar bazında yapılmasına ve tahmin doğruluğunun artırılmasına olanak tanımaktadır (Jain, 2010).

Bu çalışmada, AHP ve K-ortalama kümeleme yöntemleri bütünleşik bir yaklaşımla kullanılmıştır. İlk olarak, AHP yöntemi ile yedek parça talebini etkileyen kriterler önem derecelerine göre sıralanmış ve en önemli kriter belirlenmiştir. Daha sonra, bu kriter doğrultusunda ülkeler, benzer talep özelliklerine göre K-ortalama kümeleme yöntemi ile gruplandırılmıştır. MRG cihazlarının yedek parça taleplerinde ülkeler arasındaki yapısal ve kullanım farklılıklarını dikkate almak amacıyla, bu farklılıklara neden olan faktörler AHP yöntemi ile analiz edilmiştir. Ardından, en belirleyici kriter bazında ülkeler sınıflandırılmış ve her küme için özelleştirilmiş regresyon modelleri oluşturulmuştur. Çalışmanın bulguları, seçilen kriter doğrultusunda oluşturulan kümelere özgü regresyon modellerinin geliştirilmesi ve tartışılmasının literatüre katkı sağlayacağını göstermektedir. Önerilen yaklaşım, farklı pazarlarda yedek parça taleplerinin daha doğru tahmin edilmesine ve tahmin modellerinin yerelleştirilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, işletmelerin yedek parça temini ve cihaz bakım süreçlerini daha verimli bir şekilde yönetmelerine katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmanın temel katkısı, küresel sağlık teknolojisi pazarındaki talep tahmini süreçlerini daha sağlam bir bilimsel temele oturtmak ve operasyonel yönetim için daha özelleştirilmiş bir yaklaşım sunmaktır. AHP ile kriterlerin önem derecelerinin hesaplanması, K-ortalama kümeleme algoritması ile bu kriterler temelinde ülkelerin gruplandırılması ve her bir küme için özel regresyon modellerinin geliştirilmesi, sağlık sektörü işletmelerine önemli stratejik avantajlar sağlayacaktır. Ayrıca, ÇKKV yöntemlerinin, kümeleme algoritmalarının ve regresyon modellerinin bütünleşik kullanımının küresel sağlık teknolojisi pazarında etkin bir şekilde uygulanabileceğine dair bir yol haritası sunmayı amaçlamaktadır.

Belirtilen teorik temellerin yanı sıra, bu çalışmada geliştirilen modelin etkinliğini ve doğruluğunu değerlendirmek amacıyla uygulamalı bir vaka analizi sunulacaktır. Bu analiz, modelin küresel pazar dinamiklerine nasıl uyum sağladığını ve isabetli tahminler yaparak yedek parça yönetimi süreçlerine nasıl katkı sunduğunu ortaya koyacaktır. Tahmin sürecinde kullanılan regresyon modellerinin performansı, hata kareler ortalaması ölçütü ile değerlendirilmiş ve kümeleme yönteminin uygulanmasının tahmin doğruluğunu artırdığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma, sağlık teknolojileri pazarında isabetli tahminlerin ve etkin operasyonel stratejilerin nasıl geliştirilebileceğini ortaya koyarak literatüre önemli bir katkı sunmaktadır. Küresel pazarlarda faaliyet gösteren sağlık sektörü işletmelerinin, bu tür bütünleşik yaklaşımlar sayesinde yedek parça temini, talep tahmini ve bakım yönetimi süreçlerini daha verimli bir şekilde yönetmeleri beklenmektedir.

Bu makalede ikinci bölümde sunulan Literatür Taramasında, yedek parça talep tahminleri ve sağlık

sektöründeki tedarik zinciri yönetimi konularındaki mevcut araştırmalar incelenecek ve bu çalışmanın literatürdeki boşlukları nasıl doldurduğu tartışılacaktır. Materyal ve Yöntem bölümünde ise, bu çalışmada kullanılan AHP ve K-ortalama kümeleme yöntemlerinin detaylı açıklamaları yapılacak; AHP ile kriterlerin nasıl belirlendiği ve K-ortalama algoritması ile ülkelerin nasıl kümelendiği anlatılacaktır. Uygulama bölümünde, modelin uygulamaları ve elde edilen sonuçlar sunulacak, her bir küme için yapılan talep tahminlerinin doğruluğu değerlendirilecektir. Son olarak, Sonuç bölümünde, araştırmanın genel sonuçları özetlenecek ve gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunulacaktır.

2. Literatür Taraması

Bu bölümde, öncelikle yedek parça talep tahmini, AHP ve K-ortalama algoritmalarına yönelik yapılan çalışmalar incelenecek; ardından ise çok kriterli karar verme (ÇKKV) ve kümeleme yöntemlerinin bir arada kullanıldığı çalışmalar detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

Yedek parça stokları, müşteriye satılmak üzere olan ara veya nihai ürünler değildir. Bu nedenle, yedek parça stoklarını yönetmeye yönelik politikalar, işlemdeki ve diğer stokları yönetme politikalarından farklıdır. Kennedy vd. (2002), yedek parça stokları üzerine yapılan çalışmalara güncellemeler getirerek, bu konuyla ilgili geleceğe yönelik öngörülerini paylaşmışlardır. Yedek parça stoklarının benzersiz özellikleri tartışıldıktan sonra, yönetim sorunları, yaşa dayalı değiştirme, çok katmanlı (multi-echelon) problemler, eskiyen parça sorunları, onarılabilir yedek parçalar ve özel uygulamalarla ilgili yapılan çalışmalara dair kapsamlı bir derleme makalesi sunmuşlardır. Bacchetti ve Saccani (2012) çalışmasında, yedek parça yönetiminde akademik araştırmalar ile sektörel uygulamalar arasındaki farkları incelemişlerdir. Literatürdeki yedek parça sınıflandırması ve talep tahmini üzerine yapılan teorik katkılar, on farklı vaka çalışmasıyla değerlendirilmiş ve bu farkların nedenleri analiz edilmiştir. Yedek parça talep tahmini literatüründe, talepler genellikle düzensiz aralıklarla ortaya çıkan olaylar olarak ele alınmaktadır. Ancak, geleneksel yöntemlerle yapılan talep tahminleri çoğunlukla talebi etkileyen temel faktörleri dikkate almamaktadır. Bu bağlamda, Van der Auweraer vd. (2019) çalışmasında, yedek parça talebinin makinelerin kurulu sistem tabanına bağlı olduğunu ve bu bilgilerin tahmin süreçlerinde nasıl kullanılabileceğini incelemişlerdir. Çalışmada, yedek parça talebinin, makinelerdeki parça değişimlerinden kaynaklandığı ve bu değişimlerin önleyici bakım ya da arıza sonrası müdahalelerle gerçekleştiği vurgulanmaktadır. Topan vd. (2020), operasyonel yedek parça planlaması üzerine bir inceleme yapmışlardır. Şirket anketlerinden elde edilen verilerle, uygulamada karşılaşılan sorunlar, zorluklar ve ihtiyaçlar belirlenmiş, ayrıca operasyonel kararlar için bir sınıflandırma çerçevesi önerilmiştir. Çalışmada, gelecekteki araştırma alanları da belirlenmiş olup, bu alanlar arasında hizmet seviyesi anlaşmalarının entegrasyonu, istifade mesajlarının yönetimi, planların entegrasyonu ve bütünsel müdahale seçim yaklaşımlarının geliştirilmesi yer almaktadır. Pinçe vd. (2021), mevcut literatürdeki yedek parça talep tahmin yöntemlerini eleştirel bir bakış açısıyla gözden geçirmiş ve nicel bir analiz sunmuşlardır. İlk olarak, literatürdeki farklı araştırma akımlarının zaman içinde nasıl geliştiği açıklanmış ve her bir akım ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Mevcut çalışmalardan elde edilen verilerle yaptıkları analize dayalı olarak, hangi tahmin yöntemlerinin ne zaman ve neden tercih edilmesi gerektiğine dair detaylı bilgiler sunmuşlardır. Yedek parça temini, orijinal ekipman üreticileri için, ürünlerinin satış sonrası bakım ve onarım hizmetlerini desteklemek adına kritik öneme sahiptir. Bhalla vd. (2021) çalışmasında, önceki araştırmaların, uygulayıcılara etkili yedek parça yönetim sistemlerinin geliştirilmesi konusunda yeterli kılavuzluk sunmadığını belirterek, yakın zamandaki çalışmaların bu eksiklikleri ne ölçüde giderdiğini değerlendirmişlerdir. Mevcut yedek parça yönetimi araştırmalarının çoğunun varlık ya da ekipman sahiplerinin perspektifinden yapıldığı, ancak orijinal ekipman üreticileri (üreticiler ve tedarikçiler) açısından yapılan vaka çalışmalarının sayısının daha az olduğu ifade edilmiştir.

Liberatore ve Nydick (2008) çalışmasında, tıp ve sağlık hizmetlerinde AHP uygulamalarını incelemişlerdir. İncelenen 50 makale, tanı, hasta katılımı, tedavi, organ nakli, proje ve teknoloji değerlendirmesi, insan kaynakları planlaması ve sağlık hizmetleri değerlendirmesi gibi yedi ana kategoriye ayrılmıştır. AHP, hasta-doktor ortak kararları, tedavi seçimleri ve sağlık teknolojileri ile politikalarının değerlendirilmesinde umut verici bir destek aracı olarak öne çıkmaktadır. Ho (2008), son 20 yılda AHP'nin entegrasyonuna odaklanan uygulamaları incelemişlerdir. AHP'nin matematiksel programlama, kalite fonksiyonu göçerimi, meta-sezgisel algoritmalar, SWOT analizi ve veri zarflama analizi gibi beş farklı araçla entegrasyonu üzerine yapılan çalışmaları değerlendirmişlerdir. 1997-2006 yılları arasında yayımlanan makaleler incelenerek, bütünleşik AHP uygulamalarına hangi alanlarda daha fazla ilgi gösterildiği ve mevcut yaklaşımların eksiklikleri belirlenmiştir. Çalışmalarında, bütünleşik AHP'nin bağımsız AHP'ye kıyasla daha üstün olduğunu ve bu yöntemlerin etkili bir şekilde uygulanmasına yönelik öneriler sunduklarını ortaya koymuşlardır. Ishizaka ve Labib (2011) çalışmasında, AHP'nin başlangıcından bu yana kaydedilen gelişmeleri detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Makalenin odak noktası, AHP'nin metodolojik gelişmelerine tarafsız bir bakış sunmak olup, uygulamalara dair herhangi bir değerlendirme yapmamışlardır. Yazarlar, AHP'nin çeşitli önemli alanlarını ele almışlardır. Bu alanlar arasında problem modelleme, ikili karşılaştırmalar, yargı ölçekleri, türetim yöntemleri, tutarlılık endeksleri, eksik matrisler, ağırlıkların sentezi, hassasiyet analizi ve grup kararları yer almaktadır. Subramanian ve Ramanathan (2012) çalışmasında, operasyon yönetiminde AHP uygulamalarını incelemişler ve araştırmacılar ile

uygulayıcılar açısından potansiyel araştırma boşluklarını ortaya koymuşlardır. 1990-2009 yılları arasındaki 291 hakemli dergide yayımlanan literatür, sistematik bir şekilde kategorize edilmiştir. Yapılan analiz, AHP'nin hem nicel hem de nitel faktörlerin dikkate alındığı problemlerde, özellikle makro düzeyde ve yönetsel kararlar için yaygın bir şekilde kullanıldığını göstermektedir. Ürün ve süreç tasarımı ile tedarik zinciri yönetimi, en çok ele alınan karar konuları arasında yer almaktadır. Ayrıca, AHP'nin öngörü, tesis yerleşimi ve stok yönetimi gibi alanlarda daha fazla araştırma yapılması gerektiği tespit edilmiştir. Zyoud ve Fuchs-Hanusch (2017), AHP ve TOPSIS yöntemlerinin uygulamalarıyla ilgili yapılan araştırmaları içeren bir derleme makalesi sunmuşlardır. Tedavi zinciri yönetimi ve sürdürülebilirlik gibi alanlar, bu yöntemlerin aktif olarak kullanıldığı başlıca alanlar çıkmıştır. Liu vd. (2020), AHP'nin, öznel yargıların belirsiz olabileceği durumlarda bulanık küme teorisiyle entegrasyonunu incelemişlerdir. Çeşitli bulanık AHP tekniklerini dört ana başlık altında sınıflandırmışlardır: Bunlar, karşılaştırmalar için göreli önemin temsil edilmesi, grup kararları için bulanık kümelerin birleştirilmesi, bulanık kümenin net değere dönüştürülmesi ve yargıların tutarlılığının ölçülmesidir. Ashour ve Mahdiyar (2024), AHP yöntemine yapılan eklemeler ve iyileştirmeleri incelemişlerdir. Bu çalışma, 2010-2023 yılları arasında yayımlanan birleşik ve modifiye edilmiş AHP yöntemlerini üç ana kategoriye ayırmıştır: Bunlar, tutarlılık iyileştirmeleri, zorlukların azaltılması ve sonuç doğruluğunun artırılmasıdır.

Literatürdeki çalışmalarda, K-ortalama algoritmasının hızlı ve etkili bir yöntem olmasına rağmen, başlangıç merkezlerinin belirlenmesi ve optimum küme sayısının seçimi gibi problemlerin önemli bir araştırma konusu olduğu vurgulanmaktadır. Lund ve Ma (2021), kümeleme analiz tekniklerini ve bu tekniklerin kütüphane ve bilgi bilimi araştırmalarındaki kullanımını incelemişlerdir. Özellikle, K-ortalama ve K-medoids kümeleme yöntemlerinin bu alandaki uygulamalarını detaylandırmış ve bu tekniklerin araştırma süreçlerinde nasıl faydalı olabileceğini ele almışlardır. Ezugwu vd. (2022), veri madenciliği araştırmalarında ve uygulamalarında kümelemenin önemli bir araç olduğunu vurgulamışlardır. Geleneksel kümeleme algoritmalarının sınırlamalarına ve yüksek boyutlu veri kümeleriyle başa çıkma zorluklarına dikkat çekmiş ve aynı zamanda daha esnek ve verimli kümeleme tekniklerinin geliştirilmesine yönelik yapılan son araştırmaları incelemişlerdir. Kümeleme tekniklerinin eğitim, pazarlama, tıp, biyoloji ve biyoinformatik gibi farklı alanlardaki kullanımına dair pratik bir bakış açısı sunan bu inceleme, büyük veri, yapay zekâ ve robotik gibi disiplinlerdeki kümeleme uygulamalarını da ele almaktadır.

Son yıllarda, ÇKKV yöntemlerinin ve kümeleme algoritmalarının birleşimi, karmaşık karar destek sistemlerinde önemli bir yer tutmaktadır. ÇKKV, karar vericilerin çeşitli kriterler doğrultusunda en iyi alternatifleri seçmelerine yardımcı olan bir yöntemler bütünü olarak tanımlanırken, kümeleme algoritmaları veri setlerinden benzerliklere dayalı gruplamalar yaparak veri yapılarının daha iyi anlaşılmasını sağlar. Her iki yaklaşımın entegrasyonu, özellikle belirsizlik ve farklılaştırılmış karar alternatiflerinin bulunduğu durumlarda önemli avantajlar sunmaktadır. Literatürde, ÇKKV ve kümeleme yöntemlerinin birlikte kullanıldığı çeşitli uygulamalara yer verilmektedir. Bottani ve Rizzi (2008), tedarik süreçlerini iyileştirmek amacıyla en uygun tedarikçi/ürün ikilisi seçimi için yapılandırılmış bir yaklaşım önermişlerdir. Alternatiflerin sayısını azaltmak amacıyla, yaklaşım kümeleme analizi ve ÇKKV yöntemlerinin birleşimini kullanmaktadır. Crispim ve Sousa (2009), sanal işletmelerde partner seçiminde, ÇKKV ve kümeleme yöntemlerinin birleşimini içeren bir yaklaşım önermişlerdir. Karar verici, en uygun partnerleri belirlemek amacıyla kümeleme analizi kullanarak alternatifleri gruplandırmış ve ardından çok hedefli tabu arama meta-sezgisel algoritması ile bulanık TOPSIS algoritmasını kullanarak en iyi seçenekleri sıralamıştır. Keskin vd. (2010), tedarikçi seçim sürecini iyileştirmek için bulanık uyarlanabilir rezonans teorisi (Fuzzy ART) tabanlı bir yöntem önermişlerdir. ÇKKV sürecinde, tedarikçiler belirli kriterlere göre değerlendirilmiş ve ardından Fuzzy ART kullanılarak kümelenmiştir. Maghsoodi vd. (2018), tedarikçi seçim problemlerini ele almak için ÇKKV ve kümeleme yöntemlerinin birleştirildiği yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu yaklaşım, büyük veriye dayalı yapısal girdi ile tedarikçi seçim problemini çözmek için pratik bir yöntem sunmaktadır. Barak ve Mokfi (2019), kümeleme yöntemlerinin değerlendirilmesi ve sıralanması için ÇKKV tabanlı bir çerçeve önermişlerdir. Bu yaklaşım, farklı veri setlerinde kümeleme modellerinin karşılaştırılmasını sağlamak amacıyla üç grup ÇKKV algoritmasını birleştirmiştir. Ayrıca, parçacık sürüsü optimizasyonu ve K-ortalama kümeleme algoritmasını birleştiren melez bir kümeleme algoritması sunulmuştur. Maghsoodi vd. (2020), kümeleme analizi ve ÇKKV yöntemlerini birleştirerek büyük veri problemlerini çözmek için yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yöntem, çok sayıda alternatifin ve karmaşık değerlendirme kriterlerinin bulunduğu personel seçimi ve risk değerlendirme problemleri gibi büyük veri sorunlarını çözmek için kullanılmıştır. Sironen vd. (2020), ÇKKV yöntemleri ve kümeleme analizini kullanarak karar vericilerin önceliklerini yansıtan sağlam bir karar hiyerarşisi oluşturmayı amaçlamışlardır. AHP ile başlayan yöntem, alt kriterler arasındaki korelasyonları dikkate alarak yeni bir karar hiyerarşisi önermektedir. Chaudhuri vd. (2021), eklemeli imalat için uygun yedek parçaların belirlenmesi amacıyla ÇKKV ve kümeleme analizi yöntemlerini birleştiren bir süreç geliştirmişlerdir. ÇKKV, farklı kriterler üzerinden yedek parçaların değerlendirilmesini sağlarken, kümeleme analizi parçaların benzerliklerine göre gruplandırılmasını ve doğru seçimin yapılmasını kolaylaştırmaktadır. Sharifi vd. (2022), serbest form enjeksiyon kalıplama ile üretilebilecek parçaların belirlenmesi için iki yöntem

önermişlerdir. Kümeleme analizi ile benzer parçalar sınıflandırılmış, ardından ÇKKV yöntemleriyle bu kümeler sıralanmıştır. Li vd. (2021), havaalanı kapı atama performans göstergelerinin seçiminde ÇKKV ve kümeleme yöntemlerini bir arada kullanmışlardır. İlk olarak, bulanık AHP ile kriterlerin ağırlıkları belirlenmiş, ardından bulanık-olasılıklı c-ortalama algoritması ile göstergeler kümelenmiştir. Wu vd. (2021), enerji depolama teknolojilerinin optimal planlamasını yapmayı amaçlamışlardır. Farklı talep senaryoları için teknolojik ve uygulama koşullarını incelemek amacıyla kümeleme analizini kullanmışlar ve ardından üç aşamalı bir ÇKKV çerçevesi geliştirmişlerdir. Bu çerçeve, aralık bulanık sayılarla ve PROMETHEE-II modeliyle entegrasyon sağlamıştır. Kang ve Pang (2022), şehirlerin kentsel lojistik rekabet gücünü değerlendirmek amacıyla ÇKKV yöntemi olarak entropi ağırlıklı TODIM metodu ve K-ortalama kümeleme yöntemlerini birlikte kullanmışlardır. TODIM metodu, şehirlerin lojistik rekabet gücünü belirlemek için uygulanmış ve ardından K-ortalama kümeleme ile şehirler gruplandırılmıştır. Bait vd. (2022), Afrika'da yer seçimi kararlarını desteklemek için AHP ve TOPSIS yöntemleri ile K-ortalama kümeleme analizini birleştirmişlerdir. Yöntem, risk değerlendirmesi ve boşluk analizini içeren bir yaklaşım sunarak, yatırımcıların en uygun yer seçimlerini yapmalarını sağlamaktadır. Coşkun vd. (2022), tedarikçi değerlendirmesi ve geliştirilmesi için Entegre Sürdürülebilir Tedarikçi Değerlendirme ve Gelişim Çerçevesi (ISSED-F) geliştirmişlerdir. ISSED-F, Analitik Ağ Süreci, PROMETHEE ve kümeleme analizini birleştirerek tedarikçilerin sürdürülebilirlik kriterlerine göre değerlendirilmesini ve geliştirilmesini sağlamışlardır.

3. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, ÇKKV ve kümeleme yöntemleri bir arada kullanılarak daha doğru tahminler üreten regresyon modelleri oluşturulması amaçlanmıştır. Önerilen bütünleşik yöntem, AHP, K-ortalama kümeleme ve regresyon modelleri olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. AHP yöntemi, yedek parça taleplerini etkileyen kriterlerin göreli önem derecelerini belirlemek için kullanılmıştır. K-ortalama algoritması ise ağırlığı en yüksek olan kriter bazında ülkeleri kümeleyerek, her küme için farklı regresyon modelleri oluşturulmasını sağlamıştır. Bu regresyon modelleri, yedek parça talep tahminlerini elde etmek amacıyla kullanılmıştır. AHP ve K-ortalama kümeleme yöntemlerinin birlikte kullanımı, yedek parça talep tahminlerinin daha doğru ve verimli bir şekilde yapılmasına olanak tanımaktadır. Alt bölümlerde, kullanılan yöntemler açıklanmış ve izlenen adımlar sunulmuştur.

3.1. AHP Yöntemi

AHP, ÇKKV problemlerinde, bir dizi alternatifin ve kriterin karşılaştırılmasıyla kararlar alınmasına yardımcı olan bir yöntemdir. AHP, Thomas Saaty tarafından geliştirilen ve karar verme süreçlerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. AHP'nin ilk kez tanımlandığı kaynak 1972 yılına dayanmaktadır (Saaty, 1972). Bu yöntem, 1977 yılında Journal of Mathematical Psychology dergisinde daha ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır (Saaty, 1977).

AHP, karmaşık problemlerde, her bir kriterin göreli önem derecelerinin ve alternatiflerin değerlendirilmesinin sistematik bir şekilde yapılmasını sağlar. AHP'nin temel amacı, her bir kriterin karar verme sürecindeki önem derecesini belirlemek ve bu kriterlerin önem derecelerine bağlı olarak alternatiflerin sıralanmasına olanak sağlar. AHP'nin genel uygulama adımları aşağıda özetlenmiştir.

Adım 1: Kriterleri Belirle

AHP yönteminde kriterlerin belirlenmesi aşaması, karar verme sürecinin temelini oluşturur. Bu aşama, kararın hedefi doğrultusunda hangi kriterlerin dikkate alınacağı ve bu kriterlerin nasıl değerlendirilmesi gerektiği konusunda çok önemli bir rol oynar. Kriterlerin doğru şekilde belirlenmesi, doğru kararlar alınmasını sağlar. Bu kriterlerin göreli önem derecelerini belirlemek için ikili karşılaştırma matrisinden faydalanılır.

Adım 2: Karşılaştırma Matrisini Oluştur

AHP yönteminde, karşılaştırma matrisinin oluşturulması aşaması, kriterlerin göreli önem derecelerini belirlemek ve bu kriterlerin her birini birbiriyle karşılaştırmak için kritik bir adımdır. Bu aşama, karar verme sürecindeki tutarlılığı sağlamak ve daha sonraki aşamalarda ağırlıkların hesaplanabilmesi için temel bir yapı oluşturur. Karar vericiler tarafından kriterler arasında ikili karşılaştırmalar yaparak bir karşılaştırma matrisi oluşturulur. Her bir kriter, diğer kriterlerle karşılaştırılarak, hangi kriterin daha önemli olduğu belirlenir. Bu karşılaştırmalar, Tablo 1 ile verilen Saaty'nin önerdiği 1-9 ölçeğine göre yapılır.

Tablo 1. Saaty 1-9 ölçeği

Ölçek	Tanım
1	Eşit önemde
3	Bir kriter diğerinden daha önemli
5	Bir kriter diğerinden çok daha önemli
7	Bir kriter diğerinden çok daha fazla önemli
9	Bir kriter diğerinden son derece daha önemli
2, 4, 6, 8	Ara değerler

n adet kriter sayısına sahip karşılaştırma matrisi A, eşitlik 1 ile verilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Eş.(1)'de, a_{ij} elemanı, i. kriterin j. kriter ile karşılaştırılmasındaki göreli önemi gösterir. Bu elemanlar, karar vericilerin sağladığı karşılaştırmalara dayalıdır. $a_{ji} = 1/a_{ij}$ özelliğine karşılık olma özelliği denir.

Adım 3: Normalize edilmiş karşılaştırma matrisini oluştur.

Karşılaştırma matrisinde, n kriter için, j. sütundaki elemanların toplamı eşitlik 2 ile bulunur.

$$S_j = \sum_{i=1}^{n} a_{ij}\,, j = 1, \dots, n \quad (2)$$

Eş (1) ile verilen karşılaştırma matrisinin elemanları a_{ij}'ler, j. sütunun toplamı olan S_j değerine bölünerek normalize matris oluşturulur. Normalize matrisin elemanları olan a'_{ij}'ler eşitlik 3 ile hesaplanır.

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{S_j} \quad (3)$$

Normalizasyon işlemi, matrisin her sütunundaki tüm değerleri 1'e indirger ve her bir elemanın göreli önemini eşitlemeye yardımcı olur.

Adım 4. Kriter ağırlıklarını hesapla

Normalize edilmiş matrisin her satırındaki ortalama alınarak, i. kriterin ağırlığı olan w_i, i $= 1, \dots, n$ eşitlik 4 ile hesaplanır. Bu ağırlıklar, kriterlerin göreli önem derecelerini yansıtır.

$$w_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} a'_{ij}\,, i = 1, \dots, n \quad (4)$$

Adım 5: Tutarlılık Oranı Hesapla

AHP yönteminin doğruluğunu sağlamak için, karşılaştırma matrisinin tutarlı olması gerekmektedir. Tutarlılık, karşılaştırmalarda mantıklı bir sıralama yapıldığını ve hatalı bir değerlendirme yapılmadığını gösterir. AHP'de tutarlılık oranı CR (Consistency Ratio) ile değerlendirilir. Tutarlılık oranı, karşılaştırma matrisinin güvenilirliğini ölçmek için kullanılır. Tutarlılık ölçümü için, ilk olarak, karşılaştırma matrisinin en büyük özdeğeri (λ_{max}), eşitlik 5 ile hesaplanır. Özdeğer, matrisin ana özelliği olup, tüm kriterler arasındaki ilişkilerin bir göstergesidir.

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}w_j}{w_i}\right) \quad (5)$$

Ardından, Tutarlılık Endeksi (CI), eşitlik 6 ile hesaplanır.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (6)$$

Son olarak, tutarlılık oranı (CR) eşitlik7 ile hesaplanır.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

Eş. (7)'de, RI rastlantısal tutarlılık endeksidir. Tutarlılığı değerlendirebilmek için RI değerinin bilinmesi gerekir. n boyutlu karşılaştırma matrisleri için tanımlanan RI değerleri Tablo 2 ile verilmiştir.

Tablo 2. *RI* raslantısal tutarlılık endeksi

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41

Eğer CR değeri 0,1 veya daha düşük ise, karşılaştırmalar tutarlı kabul edilir. Aksi takdirde, kriterler arasındaki karşılaştırmalar gözden geçirilir. Tutarlılık oranı, AHP'nin güvenilirliğini ve doğruluğunu sağlamada önemli bir rol oynar. Yüksek tutarsızlık oranları, kriterlerin değerlendirilmesinde bir hata olduğunu gösterebilir.

Bu çalışmada, AHP yöntemi kullanılarak belirlenen göreli ağırlıklar, yedek parça talep tahminlerinde kullanılacak kriterlerin önem derecelerini temsil etmektedir. Bu ağırlıklar, K-ortalama kümeleme algoritması gibi kümeleme yöntemleriyle birleştirilerek ülkelerin yedek parça taleplerinin daha doğru tahmin edilmesini sağlamaktadır. AHP yöntemi ile belirlenen kriter ağırlıkları kullanılarak, benzer özelliklere sahip ülkeler gruplandırılacak ve her grup için ayrı yedek parça talep tahminleri yapılacaktır.

3.2. K-Ortalama Kümeleme Yöntemi

Kümeleme analizi, verileri gruplara ayırmak ve benzer özelliklere sahip olan veri noktalarını bir araya getirmek için kullanılan istatistiksel bir tekniktir. Kendi içlerinde homojen ve aralarında heterojen gruplar oluşturulmasına olanak sağlar (Tatlıdil, 1996). K-ortalama kümeleme yöntemi, verileri benzer özelliklere sahip gruplara ayırmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu algoritma, belirlenen k sayıda küme oluşturarak, her küme için ortak özellikler belirlemeyi amaçlar. Aşamalı olmayan kümeleme yöntemlerinden biri olan k-Ortalama kümeleme yöntemi n birimin k kümeye parçalanmasıdır. K-ortalamalar yönteminde birimleri kümelere ayırmak amacıyla öncelikle verilerden elde edilen bilgilere göre ilk k nokta çekirdek nokta olarak alınır. Bu noktaların her birinin p değişken değerleri birer ortalama vektörü olarak kabul edilir. Küme ortalama vektöründen her bir birimin uzaklıkları bir uzaklık ölçütü kullanılarak hesaplanır.

X veri matrisi, n gözlem sayısı ve p de değişken sayısı olmak üzere x_i gözlem vektörleri ve C_j küme merkezleri arasındaki uzaklık $d_{ij} = d\left(x_i, C_j\right)$ ile gösterilir. Uzaklık değerlerini ifade etmek için kullanılan geliştirilmiş pek çok metrik bulunmaktadır. Bunlardan en sık kullanılanlardan biri eşitlik 8 ile verilen Öklid uzaklığıdır.

$$d_{ij} = d\left(x_i, C_j\right) = \left[\sum_{k=1}^{p}\left|x_{ik} - C_{jk}\right|^2\right]^{1/2} \quad (8)$$

Her bir birimin uzaklıkları hesaplandıktan sonra geriye kalan $n-k$ birim en yakın ortalama vektörlü kümeye atanır. Her atamadan sonra oluşan kümenin ortalama vektörü yeniden hesaplanır ve birimlerin yeni oluşan küme ortalama vektörüne göre uzaklıkları tekrar hesaplanır. Bu sayede en yüksek benzerliğe sahip birimler bir araya toplanmış olur. Küme içi varyansın minimum ve kümeler arası varyansın maksimum olduğu kümeleme yapısına ulaşıncaya kadar tüm birimler k kümeye atanmaya devam eder. Yinelemeli yaklaşımla uygun kümeleme sağlanır. Küme içi kovaryans matrisinin minimum olduğu koşul sağlanıncaya ve yakınsama kriterine eşit ya da daha küçük varyans farkına ulaşıncaya kadar parçalama işlemine devam edilir (Tatlıdil, 1996).

Sürecin ilk adımı, verilerin kaç gruba ayrılacağının (k değeri) belirlenmesidir. Ardından, kümelerin başlangıç merkezleri rastgele veya belirli bir stratejiye göre seçilir. Her veri noktası, küme merkezlerine olan Öklid mesafesi

hesaplanarak en yakın kümeye atanır. Daha sonra, her küme için küme içindeki tüm noktaların ortalaması alınarak küme merkezleri güncellenir. Küme merkezleri güncellendikçe, veri noktaları tekrar en yakın merkeze atanır. Bu işlem, küme merkezleri sabit hale gelene kadar devam eder.

Bu çalışmada, K-ortalama algoritması, her küme için merkezleri belirleyerek benzer özelliklere sahip ülkeleri gruplandırmaktadır. Sonuç olarak, her bir küme, ortak özellikler taşıyan ülkelerden oluşmakta ve her küme için özelleştirilmiş talep tahminleri yapılabilmektedir.

3.3. Uygulama

Önerilen yöntem, 64 farklı ülkede kurulu sistemi bulunan bir MRG cihazı üreticisi işletmenin yedek parça talep tahmini ve bakım yönetimi süreçlerini iyileştirmek amacıyla uygulanmıştır. Kurulu sistem, işletmenin dünya genelindeki sağlık kurumlarına sağladığı ve hâlihazırda aktif olarak kullanılan MRG cihazlarının tamamını ifade etmektedir. Bu cihazların düzenli bakım ve yedek parça tedariki gerektirmesi, işletmenin operasyonel sürdürülebilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir. İşletmenin küresel ölçekte faaliyet göstermesi, her bir ülkenin sağlık altyapısı, ekonomik durumu ve demografik özellikleri gibi dinamiklerin değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, AHP ve K-ortalama kümeleme algoritmalarının bütünleştirilmesiyle geliştirilen model, ülkelerin belirli kriterlere göre gruplandırılmasını ve bu gruplara özgü talep tahmin modellerinin oluşturulmasını hedeflemektedir. Uygulama süreci, farklı ülkelerin verilerinin toplanması, kriterlerin belirlenmesi, kümelerin oluşturulması, talep tahmini modellerinin geliştirilmesi ve sonuçların değerlendirilmesi aşamalarını kapsamaktadır. Bu bölümde, önerilen modelin etkinliğini değerlendirmek için yapılan analizler ve elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde sunulacaktır.

Adım 1: Verilerin Toplanması

64 ülkedeki kurulu sistemlere ait cihazların özellikleri, bakım geçmişi, yedek parça talepleri ve ülkelerin ekonomik, demografik ve sağlık altyapısına ilişkin veriler toplanmıştır.

Adım 2: Kriterlerin Belirlenmesi

MRG cihazları için yedek parça talebinin ve bakım süreçlerinin optimize edilmesi amacıyla, benzer ülkelerin belirli kriterlere göre sınıflandırılması hedeflenmiştir. Ancak, ülkeler arasındaki farklılıkların çok sayıda kriterle modellenmesi, K-ortalama kümeleme yönteminin etkinliğini ve anlamlılığını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, belirlenen kriterlerin önem dereceleri AHP ile ağırlıklandırılacak ve yalnızca en yüksek göreli ağırlığa sahip kriter sınıflandırma amacıyla kullanılacaktır. Bu yaklaşım, sınıflandırma sürecini hem sadeleştirir hem de en etkili kriterin temel alınmasını sağlar. Sınıflandırmada kullanılan kriterler, cihazların performansı, operasyonel süreçlerin zorlukları ve pazar dinamiklerini yansıtan unsurlardan seçilmiştir. Aşağıda, her bir kriterin kapsamı ve önemi açıklanmıştır:

- *Ortalama Parça Talep Sayısı* (PS): Belirli bir zaman diliminde bir ülkedeki kurulu sistemler için talep edilen yedek parça miktarının ortalamasını ifade eder. Yedek parça talebi, cihazların bakım gereksinimlerini ve sistemin genel kullanım yoğunluğunu anlamak açısından kritik bir göstergedir. Yüksek talep miktarı, cihazların daha yoğun kullanıldığını veya sık arıza verdiğini gösterebilir. Bu kriter, yedek parça talebinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.
- *Operasyonel Zorluk Skoru* (ZS): Her bir ülkedeki lojistik altyapı, teknik destek kapasitesi, gümrük prosedürleri ve tedarik zinciri yönetimi gibi faktörlerin bir birleşimi olarak hesaplanan bir skor sistemidir. Operasyonel zorluklar, yedek parça temin süreçlerinde karşılaşılan güçlükleri anlamak ve optimize etmek için önemli bir parametredir.
- *Aylık Tarama Miktarı* (TM): Bir ülkedeki kurulu sistemlerin gerçekleştirdiği aylık MRG tarama sayısını ifade eder. Cihazların kullanım yoğunluğu ve aşınma oranı, aylık tarama miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Daha fazla tarama, daha fazla yedek parça talebi anlamına gelebilir. Bu kriter, cihazların bakım ve yedek parça gereksinimlerinin tahmini için önemli bir veri kaynağıdır.
- *Ortalama Kurulu Sistem Yaşı* (SY): Bu kriter, bir ülkedeki MRG cihazlarının ortalama yaşını ifade eder. Daha eski cihazlar, daha sık bakım gerektirme ve yedek parça ihtiyacı duyma eğilimindedir. Bu nedenle, kurulu sistem yaşı, tahmin modellerinde kritik bir değişken olarak öne çıkar.
- *Kurulu Sistem Kontrat Oranı* (KO): Bir ülkedeki bakım sözleşmesine sahip kurulu sistemlerin toplam kurulu sistemler içindeki oranıdır. Yüksek kontrat oranı, düzenli bakım ve yedek parça taleplerinin daha öngörülebilir olmasını sağlar. Aynı zamanda, işletmenin bu sistemler üzerindeki kontrolünü artırır ve süreçleri daha iyi yönetebilmesini mümkün kılar.
- *Premium Segment Oranı* (PR): Premium segmentte yer alan cihazların toplam kurulu sistem içindeki oranını ifade eder. Premium cihazlar genellikle daha ileri teknolojilere sahiptir ve bakım gereksinimleri standart cihazlara göre daha farklı ve maliyetli olabilir. Bu oran, bir pazarın teknoloji yoğunluğunu değerlendirmek için kullanılır.
- *Performans Segment Oranı* (PE): Performans segmentinde yer alan cihazların toplam kurulu sistem içindeki oranıdır. Bu segment, daha yaygın kullanılan ve genellikle temel ihtiyaçları karşılayan cihazlardan oluşur. Performans segmentindeki cihazlar, bakım ve yedek parça ihtiyaçları açısından farklı bir profil sunar.

AHP ile, yukarıda tanımlanan 7 kriter ikili karşılaştırmalarla değerlendirilecek ve kriterlerin ağırlıkları belirlenecektir. Elde edilen ağırlıklar sonucunda, en yüksek göreli ağırlığa sahip kriter seçilecek ve bu kriter, K-ortalama kümeleme yönteminde sınıflandırma amacıyla kullanılacaktır. Bu yaklaşımın temel amacı, kriter sayısını azaltarak K-ortalama yöntemiyle daha net, anlamlı ve doğru kümeler

oluşturabilmektir. Sonuç olarak, bu süreç yalnızca ülkelerin benzer özelliklerini daha etkili bir şekilde gruplandırmayı sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda yedek parça talebi ve bakım yönetimi süreçlerinin optimize edilmesine katkıda bulunacaktır.

Adım 3: Karşılaştırma Matrisinin Oluşturulması ve Ağırlıkların Hesaplanması

En önemli kriterin belirlenmesi amacıyla en yüksek önem derecesine sahip kriter seçimi için AHP yöntemi uygulanmıştır. AHP, karar verme sürecinde birden fazla kriterin göreli önemlerini karşılaştırarak, bu kriterlere ait ağırlıkları belirlemeyi sağlayan sistematik bir yöntemdir. Sürecin temel aşamaları, kriterler arasında ikili karşılaştırmaların yapılması, tutarlılığın kontrol edilmesi ve ağırlık değerlerinin hesaplanmasıdır.

Kriterler arasındaki önem derecelerini belirlemek amacıyla, çalışmada alanında uzman 4 farklı kişiden oluşan karar vericilerden ikili karşılaştırma matrisleri doldurmaları istenmiştir. Her bir karar verici, kriterlerin birbiriyle göreli önemini değerlendirmiş ve bu değerlendirmeler ikili karşılaştırma matrisi formunda ifade edilmiştir. AHP uygulamasının bu aşamasında, her bir kriterin bir diğerine kıyasla ne kadar önemli olduğu, uzmanların deneyim ve bilgi birikimine dayanarak belirlenmiştir. Karar vericiler tarafından oluşturulan ikili karşılaştırma matrisleri Tablo 3-6 ile verilmiştir.

Tablo 3. Karar verici 1 tarafından oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi

	PS	ZS	TM	SY	KO	PR	PE
PS	1,00	3,00	2,00	0,50	0,33	0,25	0,25
ZS	0,33	1,00	0,50	0,33	0,20	0,17	0,17
TM	0,50	2,00	1,00	0,50	0,25	0,20	0,20
SY	2,00	3,00	2,00	1,00	0,50	0,33	0,33
KO	3,00	5,00	4,00	2,00	1,00	0,50	0,50
PR	4,00	6,00	5,00	3,00	2,00	1,00	1,00
PE	4,00	6,00	5,00	3,00	2,00	1,00	1,00

Tablo 4. Karar verici 2 tarafından oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi

	PS	ZS	TM	SY	KO	PR	PE
PS	1,00	0,13	0,50	0,25	0,33	0,17	0,25
ZS	8,00	1,00	6,00	4,00	5,00	2,00	3,00
TM	2,00	0,17	1,00	0,33	0,50	0,14	0,20
SY	4,00	0,25	3,00	1,00	2,00	0,25	0,33
KO	3,00	0,20	2,00	0,50	1,00	0,25	0,20
PR	6,00	0,50	7,00	4,00	4,00	1,00	2,00
PE	4,00	0,33	5,00	3,00	2,00	0,50	1,00

Tablo 5. Karar verici 3 tarafından oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi

	PS	ZS	TM	SY	KO	PR	PE
PS	1,00	3,00	0,50	2,00	0,50	4,00	4,00
ZS	0,33	1,00	0,25	0,33	0,20	2,00	2,00
TM	2,00	4,00	1,00	3,00	0,50	6,00	6,00
SY	0,50	3,00	0,33	1,00	0,33	5,00	5,00
KO	2,00	5,00	2,00	3,00	1,00	7,00	7,00
PR	0,25	0,50	0,17	0,20	0,14	1,00	1,00
PE	0,25	0,50	0,17	0,20	0,14	1,00	1,00

Tablo 6. Karar verici 4 tarafından oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi

	PS	ZS	TM	SY	KO	PR	PE
PS	1,00	4,00	0,20	0,33	0,17	0,17	0,25
ZS	0,25	1,00	0,17	0,50	0,17	0,17	0,20
TM	5,00	6,00	1,00	5,00	0,33	0,50	2,00
SY	3,00	2,00	0,20	1,00	0,20	0,25	0,50
KO	6,00	6,00	3,00	5,00	1,00	2,00	5,00
PR	6,00	6,00	2,00	4,00	0,50	1,00	3,00
PE	4,00	5,00	0,50	2,00	0,20	0,33	1,00

Tablo 3-6 ile verilen karşılaştırma matrislerinin tutarlılık oranları sırasıyla 0,015984; 0,041956; 0,024140; 0,072493 olarak bulunmuştur. Bu tutarlılık oranları 0,10 değerinden küçük olduğu için matrisler tutarlıdır.

4 farklı karar vericinin oluşturduğu ikili karşılaştırma matrislerinin sonuçlarını birleştirmek amacıyla geometrik ortalama yöntemi kullanılmıştır. Geometrik ortalama, uzman görüşlerindeki farklılıkları dengelemek ve ortak bir değerlendirme elde etmek için etkili bir yaklaşımdır. Bu süreçte, her bir kriter çifti için uzmanların verdiği değerlerin geometrik ortalamaları alınmıştır. Elde edilen tek bir ikili karşılaştırma matrisi, AHP'nin geri kalan adımlarını uygulamak için temel oluşturmuştur. Geometrik ortalama alınması sonucunda elde edilen birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisi Tablo 7'te verilmiştir.

Tablo 7. Birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisi

	PS	ZS	TM	SY	KO	PR	PE
PS	1,00	1,46	0,56	0,54	0,31	0,41	0,50
ZS	0,69	1,00	0,59	0,69	0,43	0,58	0,67
TM	1,78	1,68	1,00	1,26	0,38	0,54	0,83
SY	1,86	1,46	0,80	1,00	0,51	0,57	0,73
KO	3,22	2,34	2,63	1,97	1,00	1,15	1,37
PR	2,45	1,73	1,85	1,76	0,87	1,00	1,57
PE	2,00	1,50	1,20	1,38	0,58	0,64	1,00

Birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisinin tutarlılık oranı 0,007781 bulunmuştur. Geometrik ortalama yöntemiyle oluşturulan matris üzerinde, kriterlerin ağırlık değerleri

hesaplanmıştır. Bu hesaplama, öncelikle matrisin sütunlarının normalize edilmesi ve ardından satır ortalamalarının alınmasıyla gerçekleştirilmiştir. Normalize edilmiş ikili karşılaştırma matrisi Tablo 8 ile verilmiştir.

Tablo 8. Normalize edilmiş ikili karşılaştırma matrisi

	PS	ZS	TM	SY	KO	PR	PE
PS	0,08	0,13	0,07	0,06	0,08	0,08	0,08
ZS	0,05	0,09	0,07	0,08	0,10	0,12	0,10
TM	0,14	0,15	0,12	0,15	0,09	0,11	0,12
SY	0,14	0,13	0,09	0,12	0,12	0,12	0,11
KO	0,25	0,21	0,30	0,23	0,25	0,24	0,21
PR	0,19	0,16	0,21	0,20	0,21	0,20	0,24
PE	0,15	0,13	0,14	0,16	0,14	0,13	0,15

Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanan kriterlerin göreli ağırlık değerleri Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Kriterlerin göreli ağırlık değerleri

Kriterler	Ağırlıklar
PS	0,081410
ZS	0,087811
TM	0,125527
SY	0,118886
KO	0,239698
PR	0,202241
PS	0,144427

AHP'nin sonucunda kriterlerin göreli ağırlık değerleri incelendiğinde, kriterler arasından en yüksek ağırlık değerine sahip olan kriter 0,239698 ağırlığına sahip olan "Kurulu Sistem Kontrat Oranı" (KO) kriteri olarak belirlenmiş ve K-ortalama kümeleme yönteminde kullanılmak üzere seçilmiştir. Bu süreç, analizlerin daha net ve anlamlı bir şekilde yapılabilmesi için en etkili kriterin belirlenmesini sağlamıştır.

Adım 4: K-ortalama Kümeleme ile Ülkelerin Sınıflandırılması (SPSS Uygulaması)

AHP ile yapılan değerlendirme sonucunda, "Kurulu Sistem Kontrat Oranı" (KO) kriteri en yüksek göreli ağırlık değerine sahip kriter olarak belirlenmiştir. Bu kritere bağlı olarak, 64 farklı ülkede kurulu sistemlerin sınıflandırılması amacıyla K-ortalama kümeleme yöntemi kullanılmıştır. Analizler IBM SPSS 26 İstatistik paket programı kullanılarak yapılmıştır.

Bu analizde, "Kurulu Sistem Kontrat Oranı" verisine dayalı olarak ülkeler arasındaki benzerlikler tespit edilip, bu ülkeler anlamlı gruplara ayrılacaktır. Ülkeler bazında KO Tablo 10 ile verilmiştir.

Tablo 10. Ülkelere ait KO verisi

Ülke	KO	Ülke	KO	Ülke	KO
Ülke1	0,57	Ülke8	0,63	Ülke15	0,84
Ülke2	0,93	Ülke9	0,54	Ülke16	0,93
Ülke3	0,85	Ülke10	0,53	Ülke17	0,89
Ülke4	0,15	Ülke11	0,74	Ülke18	0,74
Ülke5	0,86	Ülke12	0,69	...	...
Ülke6	0,68	Ülke13	0,64	Ülke63	0,76
Ülke7	0,71	Ülke14	0,78	Ülke64	0,75

Kümeleme analizine başlamadan önce, analiz için uygun küme sayısı belirlenmiştir. Çalışma kapsamında küme sayısı 4 olarak seçilmiştir. Bu seçim, ülkeler arasındaki önemli operasyonel farklılıkların daha net bir şekilde ayrıştırılmasını sağlamak ve her bir grubun benzersiz özelliklerini yansıtmak amacıyla yapılmıştır.

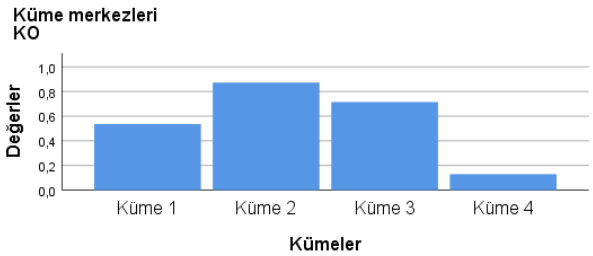
64 ülke, K-ortalama kümeleme yöntemi ile her bir ülkeyi KO kriteri temelinde birbirine benzer özellikler gösteren ülkeleri aynı gruba yerleştirilerek 4 kümeye ayrılmıştır. Toplamda 6 yineleme yapılmıştır. Tablo 11'de her kümede bulunan ülke sayıları verilmiştir. Küme merkezlerine ait grafik Şekil 1 ile verilmiştir.

K-ortalama kümelemenin KO kriterine göre istatistiksel olarak anlamlı bulunduğunu gösteren Varyans analizi tablosu (ANOVA) Tablo 12 ile verilmiştir ($P<0,05$).

Her bir kümede yer alan ülkeler Tablo 13 ile verilmiştir. Kümeler içerisindeki her bir numara farklı bir ülkeyi temsil etmektedir.

Tablo 11. Her kümedeki ülke sayısı

Kümeler	Ülke sayıları
1	17
2	20
3	22
4	5
Toplam	64



Şekil 1. K-ortalama kümeleme ile bulunan küme merkezleri.

Tablo 12. Varyans analizi tablosu

	KKO	Küme sd	HKO	Hata sd	F	p
KO	0,87	3	0,003	60	309,20	0.00

Sd= Serbestlik derecesi; HKO= Hata kareler ortalaması; KKO= Küme kareler ortalaması; KO= Kurulu sistem kontrat oranı

Tablo 13. KO kriteri temelinde oluşturulan ülkelerin kümelenmesi

Küme 1	Küme 2	Küme 3	Küme 4
1, 8, 9, 21, 25, 27, 28, 30, 37, 38, 40, 41, 52, 56, 60, 61, 62	2, 3, 5, 15, 16, 17, 19, 26, 34, 36, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 51, 53, 58	6, 7, 11, 12, 13, 14, 18, 23, 24, 29, 31, 32, 33, 35, 39, 49, 54, 55, 57, 59, 63, 64	4, 10, 20, 22, 43

Bu kümeleme, ülkeler arasında özelleştirilmiş stratejiler geliştirilmesine olanak tanır. Aynı kümeye ait ülkeler, operasyonel ihtiyaçlar ve yedek parça talepleri açısından benzerlik gösterdiğinden, bu gruplar için daha hedeflenmiş ve etkili planlamalar yapılabilir. Elde edilen kümeler, tedarik zincirinin yönetimi, bakım süreçleri ve kaynak tahsisi gibi operasyonel süreçlerde karar alıcılar için önemli bir rehber olacaktır.

K-ortalama yöntemiyle oluşturulan bu sınıflandırma, ülkeler arasındaki farklılıkları daha iyi anlamak ve kurulu sistemlerin yönetimini optimize etmek için temel bir adım olarak değerlendirilecektir. Ayrıca, stratejik kararların alınmasında önemli bir rol oynayacaktır. Bu kümeler, her bir ülkenin kendine özgü operasyonel ihtiyaçlarını karşılamak için daha etkili bir yaklaşım geliştirilmesine yardımcı olacaktır.

Adım 5: Türkiye'nin bulunduğu Küme için Yedek Parça Talep Tahmini için geliştirilen regresyon modelleri ve performansları

Türkiye'nin ülke kodu 30 olup, K-ortalama kümeleme sonucunda Küme 1'de yer almıştır. Türkiye ile birlikte bu kümede 17 ülke bulunmaktadır. Bu 17 ülke için talep edilen MRG cihazına ait yedek parça sayıları (y) ve kurulu MRG sistemi sayıları (x) kullanılarak, kümeleme yapmadan önceki ve KO kriterine bağlı K-ortalama ile kümeleme yaptıktan sonraki regresyon modelleri ve performans değerleri Tablo 14 ile verilmiştir. Regresyon modelleri için varsayım kontrolleri olan hataların normal dağılıma uygunluğu Kolmogorov-Smirnov testi ile sınanmış ve normal dağılıma uygun bulunmuştur (P>0,05).

Tablo 14 incelendiğinde, kümeleme öncesi ve sonrası üç farklı regresyon modeli (doğrusal, karesel ve kübik) kurularak performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Her bir regresyon modeline ait determinasyon katsayısı R^2 ve hata kareler ortalaması (HKO) ölçütüne göre performansları izlenmiştir. Tablo 11'de her bir regresyon modelinin 0,05 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir (P<0,05). Ancak bağımsız değişkenin bağımlı değişkeni açıklama oranı olan R^2 en yüksek kümeleme sonrası kübik regresyon modeline ait olduğu (%73,51) ve HKO en küçük olan modelin de yine bu model olduğu görülmektedir. Buna göre en isabetli tahminler yapan modelin Kümeleme sonrası oluşturulan kübik model olduğu gözlenmektedir.

Tablo 14. Regresyon modelleri

Regresyon Modelleri (Kümeleme öncesi)	R^2	HKO	p
$\hat{y} = -2{,}886 + 0{,}03560x$	%38,49	17111	0,00
$\hat{y} = 13{,}18 + 0{,}008573x + 0{,}000002x^2$	%43,86	15625	0,00
$\hat{y} = -11{,}25 + 0{,}06992x - 0{,}000008x^2 + 0{,}0000001x^3$	%54,94	12547	0,00
Regresyon Modelleri (Kümeleme sonrası)	**R^2**	**HKO**	**p**
$\hat{y} = -0{,}9320 + 0{,}09988x$	%66,83	213	0,00
$\hat{y} = 1{,}884 + 0{,}05933x + 0{,}000032x^2$	%72,00	180	0,00
$\hat{y} = 0{,}1493 + 0{,}09966x - 0{,}000048x^2 + 0{,}0000001x^3$	%73,51	170,9	0,00

5. Sonuç

Bu çalışma, sağlık teknolojileri sektöründe yedek parça yönetimi ve operasyonel stratejiler geliştirme süreçlerini desteklemek amacıyla AHP ve K-ortalama kümeleme yöntemlerini entegre bir yaklaşımla kullanmıştır. AHP, bu süreçte, farklı kriterlerin göreli önemlerini belirlemek için kullanılmış ve analizde yalnızca en yüksek ağırlığa sahip kriter seçilerek, K-ortalama kümeleme yönteminde kullanılacak temel veri sağlanmıştır. Bu yöntem, ÇKKV sürecini daha sistematik ve sağlam bir temele oturtarak, doğru ve etkili bir kümeleme analizi yapılmasını mümkün kılmıştır.

Çalışmada, 64 farklı ülkede kurulu sistemlerin sınıflandırılması için "Kurulu Sistem Kontrat Oranı" kriteri AHP ile belirlenmiş ve K-ortalama kümeleme sonucunda ülkeler 4 farklı kümeye ayrılmıştır. Bu gruplar, benzer özelliklere sahip ülkelerin bir araya getirildiği kümeler oluşturmuş ve bu kümeler, yedek parça talep tahmini ve kaynak tahsisi süreçlerinde stratejik avantajlar sunmuştur.

Kümeleme çalışmasının temel mantığı, benzer özelliklere sahip ülkelerin aynı kümelere alınması sonucunda yedek parça talep tahminlerinin daha doğru yapılmasını sağlamaktır. Çalışmanın sonuçları, bu hedefin başarıldığını ve talep tahminlerinin daha doğru bir şekilde yapılabildiğini ortaya koymuştur. Bu doğruluk, kaynakların daha etkin kullanılmasını ve sağlık hizmetleri süreçlerinin optimize edilmesini sağlayarak sektöre stratejik faydalar sağlamaktadır.

Elde edilen kümeler, ülkeler arasındaki farklılıkların anlaşılmasını ve her bir grubun kendine has ihtiyaçlarına uygun stratejiler geliştirilmesini mümkün kılmıştır. Özellikle aynı kümede yer alan ülkeler için yedek parça

tedariki ve bakım planlamalarının özelleştirilmesi, kaynakların daha verimli kullanılmasını ve operasyonel süreçlerin optimize edilmesini sağlamıştır. Bu yaklaşım, sağlık sektöründe kesintisiz hizmet sunumuna doğrudan katkıda bulunurken, tedarik zinciri yönetiminde de büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Bütünleşik AHP ve K-ortalama yöntemlerinin bu çalışmada sağladığı başarı, bu tür veri odaklı yaklaşımların operasyonel yönetim süreçlerindeki etkisini göstermektedir. Ancak, çalışmanın sınırlılıkları da göz önünde bulundurulmalıdır. Analizler yalnızca "Kurulu Sistem Kontrat Oranı" kriteri temel alınarak gerçekleştirilmiş olup, daha fazla kriterin dahil edilmesi veya daha geniş veri setleriyle çalışılması, sonuçların doğruluğunu ve kapsamını artırabilir. Ayrıca, ülkelerin ekonomik durumları, sağlık sistemlerinin yapısı gibi daha geniş kapsamlı değişkenlerin de modele eklenmesi, daha detaylı ve çok yönlü sonuçlar elde edilmesini sağlayabilir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, AHP ile seçilecek farklı kriterlerin ve diğer kümeleme yöntemlerinin bu süreçlere entegrasyonunu araştırabilir. Özellikle büyük veri analitiği ve diğer kümeleme algoritmalarının entegrasyonu, daha geniş veri setleri üzerinde daha özelleştirilmiş ve etkili stratejiler geliştirilmesine olanak tanıyabilir.

Bu çalışmada, AHP ve K-ortalama yöntemlerinin güçlü bir şekilde entegre edilerek, sağlık sektöründe operasyonel süreçlerin iyileştirilmesi ve stratejik planlamaların daha etkin yapılabilmesi için güçlü bir model sunulmuştur. Bu tür yöntemlerin uygulanması, küresel pazarlarda faaliyet gösteren sağlık işletmeleri için daha sürdürülebilir ve verimli bir geleceğin kapılarını aralayacaktır.

Ülkelerin "Kurulu Sistem Kontrat Oranı" kriterine bağlı olarak kümelendirilmesi ve bu kümeler için tahmin modellerinin ayrı olarak oluşturulması daha isabetli tahminlerde bulunulmasını sağlamıştır. Çalışma kapsamında kurulan regresyon modelleri sayesinde ileriye yönelik yedek parça sayılarının tahminlenmesi stok yönetimini yapabilmek, tedarik süreçlerini yönetebilmek için faydalıdır. MRG cihazına ait talep edilen yedek parça sayılarının öngörülmesi sayesinde planlamaların doğru bir şekilde yapılması sağlanacak bu sayede maliyetler azalacak ve zamandan tasarruf edilecektir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	D.İ.S.	K.D.A.	T.D.
K	50	30	20
T	40	30	30
Y	40	35	25
VTI	50	20	30
VAY	40	30	30
KT	40	25	35
YZ	40	35	25
KI	40	30	30
GR	50	30	20
PY	50	35	25
FA	40	30	30

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

Ashour M, Mahdiyar A. 2024. A comprehensive state-of-the-art survey on the recent modified and hybrid analytic hierarchy process approaches. Appl Soft Comput, 150: 111014.

Bacchetti A, Saccani N. 2012. Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. Omega, 40(6): 722-737.

Bait S, Lauria SM, Schiraldi MM. 2022. A risk-based hybrid multi-criteria approach to support managers in the industrial location selection in developing countries: A case study of textile sector in Africa. J Clean Prod, 335: 130325.

Barak S, Mokfi T. 2019. Evaluation and selection of clustering methods using a hybrid group MCDM. Expert Syst Appl, 138: 112817.

Bhalla S, Alfnes E, Hvolby HH, Sgarbossa F. 2021. Advances in spare parts classification and forecasting for inventory control: A literature review. IFAC-Papers OnLine, 54(1): 982-987.

Bottani E, Rizzi A. 2008. An adapted multi-criteria approach to suppliers and products selection - An application oriented to lead-time reduction. Int J Prod Econ, 111(2): 763-781.

Chaudhuri A, Gerlich HA, Jayaram J, Ghadge A, Shack J, Brix BH, Hoffbeck LH, Ulriksen N. 2021. Selecting spare parts suitable for additive manufacturing: a design science approach. Product Plan Control, 32(8): 670-687.

Chopra S, Meindl P. 2020. Supply chain management: strategy, planning, and operation. Pearson, Boston USA, pp: 254.

Coşkun SS, Kumru M, Kan NM. 2022. An integrated framework for sustainable supplier development through supplier

evaluation based on sustainability indicators. J Clean Prod, 335: 130287.

Crispim JA, Pinho de Sousa J. 2009. Partner selection in virtual enterprises: a multi-criteria decision support approach. Int J Prod Res, 47(17): 4791-4812.

Ezugwu AE, Ikotun AM, Oyelade OO, Abualigah L, Agushaka JO, Eke CI, Akinyelu AA. 2022. A comprehensive survey of clustering algorithms: State-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects. Eng Appl Artif Intell, 110: 104743.

Ho W. 2008. Integrated analytic hierarchy process and its applications A literature review. Eur J Oper Res, 186(1): 211-228.

Ishizaka A, Labib A. 2011. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. Expert Syst Appl, 38(11): 14336-14345.

Jain AK. 2010. Data clustering: 50 years beyond K-means. Pattern Recognit Lett, 31(8): 651-666.

Kang X, Pang H. 2022. City selection for fresh produce e-commerce's market entry strategy: Based on the perspective of urban logistics competitiveness. Transp Res Interdiscip Perspect, 13: 100537.

Kennedy WJ, Patterson JW, Fredendall LD. 2002. An overview of recent literature on spare parts inventories. Int J Prod Econ, 76(2): 201-215.

Keskin GA, İlhan S, Özkan C. 2010. The Fuzzy ART algorithm: A categorization method for supplier evaluation and selection. Expert Syst Appl, 37(2): 1235-1240.

Li H, Wu X, Liang Y, Zhang C. 2021. A multistakeholder approach to the airport gate assignment problem: Application of fuzzy theory for optimal performance indicator selection. Comput Intell Neurosci, 2021(1): 2675052.

Liberatore MJ, Nydick RL. 2008. The analytic hierarchy process in medical and health care decision making: A literature review. Eur J Oper Res, 189(1): 194-207.

Liu Y, Eckert CM, Earl C. 2020. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. Expert Syst Appl, 161: 113738.

Lund B, Ma J. 2021. A review of cluster analysis techniques and their uses in library and information science research: k-means and k-medoids clustering. Performance Measurement and Metrics, 22(3): 161-173.

Maghsoodi AI, Kavian A, Khalilzadeh M, Brauers WK. 2018. CLUS-MCDA: A novel framework based on cluster analysis and multiple criteria decision theory in a supplier selection problem. Comput Ind Eng, 118: 409-422.

Maghsoodi AI, Riahi D, Herrera-Viedma E, Zavadskas EK. 2020. An integrated parallel big data decision support tool using the W-CLUS-MCDA: A multi-scenario personnel assessment. Knowl Based Syst, 195: 105749.

Pinçe Ç, Turrini L, Meissner J. 2021. Intermittent demand forecasting for spare parts: A Critical review. Omega, 105: 102513.

Porter ME, Teisberg EO. 2006. Redefining Health Care: Creating Value-Based Competition on Results. Harvard Business School Press, Boston, USA, pp: 56.

Saaty T. 1972. An eigenvalue allocation model for prioritization and planning. In Working paper, Energy Management and Policy Center: University of Pennsylvania, Pennsylvania, USA, pp:321.

Saaty TL. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. J Math Psychol, 15(3): 234-281.

Saaty TL. 1980. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill., New York, USA, pp:126.

Sharifi E, Chaudhuri A, Vejrum Waehrens B, Guldborg Staal L, Lindemann CF, Davoudabadi Farahani S. 2022. Part selection for Freeform Injection Moulding: comparison of alternate approaches using a novel comprehensive methodology. Int J Prod Res, 60(23): 6996-7012.

Sironen S, Kangas J, Leskinen P. 2020. Restructuring a correlated multilevel decision hierarchy in multicriteria decision analysis. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 27(5-6): 266-285.

Subramanian N, Ramanathan R. 2012. A review of applications of Analytic Hierarchy Process in operations management. Int J Prod Econ, 138(2): 215-241.

Tatlıdil H. 1996. Uygulamalı çok değişkenli istatistiksel analiz. Cem Ofset, Eylül, Ankara, Türkiye, ss: 200.

Topan E, Eruguz AS, Ma W, Van der Heijden MC, Dekker R. 2020. A review of operational spare parts service logistics in service control towers. Eur J Oper Res, 282(2): 401-414.

Topol E. 2019. Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again. Basic Books, New York, USA, pp: 54.

Van der Auweraer S, Boute RN, Syntetos AA. 2019. Forecasting spare part demand with installed base information: A review. Int J Forecast, 35(1): 181-196.

Wu Y, Zhang T, Zhong K, Wang L, Xu C, Xu R. 2021. Optimal planning of energy storage technologies considering thirteen demand scenarios from the perspective of electricity Grid: A Three-Stage framework. Energy Convers Manag, 229: 113789.

Zyoud SH, Fuchs-Hanusch D. 2017. A bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques. Expert Syst Appl, 78: 158-181.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1639478

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 672-679 / May 2025

DESIGN OF A CHAOTIC SPEED-CONTROLLED MIXING DEVICE AND EFFICIENCY ANALYSIS IN BIOGASS

Muhammed Salih SARIKAYA[1], Mert Süleyman DEMİRSOY[1*], Mustafa Çağrı KUTLU[1,2]

[1]*Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Tecnology, Department of Mechatronic Engineering, 54050, Sakarya, Türkiye*
[2]*Military Technology College, Department of System Engineering, 111, Muscat, Oman*

Abstract: This study investigates the impact of chaotic speed-controlled mixing on biogas production efficiency and compares it with conventional fixed-speed mixing. Traditional mixing methods, often operated at fixed speeds or continuous modes, lead to high energy consumption and microbial instability. To address this, a hybrid mixing system combining a helical and propeller shaft was designed to enhance substrate homogenization and biochemical reaction efficiency. A Programmable Logic Controller (PLC) was integrated for automatic process control, while chaotic mixing algorithms, based on Hadley, Halvorsen, Lorenz, and Sprott-A systems, dynamically adjusted the mixing speed to optimize performance. Experiments were conducted at 20°C and 30°C under controlled laboratory conditions. Results showed that chaotic mixing significantly improved methane yield and combustion duration compared to fixed-speed mixing. At 20°C, the Chaotic Sprott-A method produced 18 L/day of methane, compared to 16 L/day with fixed-speed mixing. At 30°C, the Sprott-A method reached 22 L/day, surpassing the 20 L/day of the fixed-speed method. Additionally, combustion duration, an indicator of biogas quality, increased from 740 seconds (fixed-speed) to 829 seconds (Chaotic Sprott-A). These findings confirm that chaotic mixing enhances substrate distribution, improves biochemical reaction efficiency. Chaotic speed-controlled mixing presents a promising alternative for biogas reactors, offering higher methane production.

Keywords: Biogas production, Chaos, Mechanical mixing, Speed control

***Corresponding author:** Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Tecnology, Department of Mechatronic Engineering, 54050, Sakarya, Türkiye
E mail: mertdemirsoy@subu.edu.tr (M. S. DEMİRSOY)
Muhammed Salih SARIKAYA https://orcid.org/0000-0002-2809-9896
Mert Süleyman DEMİRSOY https://orcid.org/0000-0002-7905-2254
Mustafa Çağrı KUTLU https://orcid.org/0000-0003-1663-2523

Received: February 13, 2025
Accepted: March 15, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Sarikaya MS, Demirsoy MS, Kutlu MC. 2025. Design of a chaotic speed-controlled mixing device and efficiency analysis in biogas. BSJ Eng Sci, 8(3): 672-679.

1. Introduction

In recent years, the increasing demand for sustainable energy solutions and effective waste management has heightened interest in the design of biogas production devices. Biogas production involves the anaerobic digestion of organic matter into biogas (primarily methane and carbon dioxide) through four fundamental stages: hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, and methanogenesis (Kabeyi and Olanrewaju, 2022). The optimization of biogas production processes is crucial for enhancing economic efficiency and sustainability through advanced design and operational applications (Shapovalov et al., 2023). Energy efficiency in biogas production is another critical component influenced by the mixing methods employed. Mechanical mixers have been shown to significantly impact the energy consumption of reactors. For instance, slow-moving inclined mixers can reduce energy consumption by 70% compared to high-speed submersible mixers while maintaining mixing quality (Lemmer et al., 2013). This finding underscores the necessity of selecting energy-efficient mixer designs to enhance the sustainability of biogas production systems (Spodoba and Zablodskiy, 2021; Gbadeyan et al., 2024). Therefore, determining appropriate mixer types and implementing strategic mixing regimes are key factors that can improve biogas yield and overall system performance.

Various studies have focused on the design of biogas digesters and their adaptation to different contexts. For example, research on household biogas digesters emphasizes the importance of materials used to enhance biogas yield (Rajendran et al., 2012; Obileke et al., 2020; Obileke et al., 2021). Additionally, innovative designs such as portable biogas digesters have been developed for use in rural areas of developing countries. However, the commonly used shaking method in biogas production has been reported to have low efficiency (Sebayuana et al., 2021). A study conducted in Poland on biogas production from pig manure highlighted the importance of desulfurization and feedstock selection in process efficiency (Kapłan et al., 2021). Effective mixing enhances substrate homogeneity, improving mass transfer and ultimately increasing biogas yield. In this context, the impact of different mixer designs on biogas production efficiency has been examined. For example, mechanical mixers (such as paddle and helical ribbon impellers) directly affect the performance of anaerobic digesters (Singh et al., 2021; Singh et al., 2021). The selection of the

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

impeller type, its position within the digester, and its dimensions are critical factors in maximizing energy efficiency and enhancing the biodegradation of organic matter (Mahmoodi-Eshkaftaki and Rahmanian-Koushkaki, 2022).

The optimization of mixing parameters has been shown to increase biogas production. Moreover, comparisons among continuous, semi-continuous, and intermittent mixing strategies have revealed that semi-continuous mixing performs best in enhancing biogas yield and maintaining a more stable environment that supports microbial activity (Kashfi et al., 2021). Chaotic mixing, characterized by irregular and complex flow patterns, has the potential to improve mass transfer and substrate homogenization, which are critical for biogas production. Studies by Boesinger et al. have investigated reactive chaotic flow dynamics in tubular reactors, suggesting that chaotic mixing can increase reaction rates compared to static mixers (Boesinger et al., 2005). Martí-Herrero et al. achieved a 44% increase in biogas production through optimized grid modeling in biogas reactors (Martí-Herrero et al., 2014).

Another significant study on the application of chaotic mixing in biogas production introduced a novel chaotic mixer design based on a delta robot and tested its effectiveness in achieving homogeneity in solid-liquid mixtures (Kalayci et al., 2021). Experimental results demonstrated that more homogeneous mixtures could be obtained in a shorter time compared to conventional mixing methods. Chaotic mixing has been identified as an effective approach for optimizing digestion by enhancing substrate mixing and microbial contact. Furthermore, research on polymer composites has shown that chaotic mixing provides high mixing efficiency while minimizing damage to sensitive components (Tabkhpaz et al., 2015). These principles can also be applied in the context of biogas production.

The potential of chaotic mixing to enhance biogas production is supported by studies investigating the mixing of different organic materials, such as kitchen waste and poultry manure. Research by Mousa indicates that appropriate substrate integration can increase methane production and that chaotic mixing techniques can be beneficial in this process (Mousa et al., 2016). Overall, studies suggest that chaotic mixing can improve substrate homogeneity, reduce energy consumption, and enhance biogas yield.

Integrating the mixing process into an automation system presents a significant innovation that can optimize both energy efficiency and microbial activity in biogas production processes. The literature indicates that mixing operations are typically performed at fixed speeds or in continuous mode, which increases energy consumption and negatively affects microbial stability. This study aims to enhance biogas production efficiency by improving substrate homogeneity through a hybrid mixing shaft design, which incorporates both helical shaft and propeller blades. The semi-continuous mixing strategy ensures sustainable microbial activity while simultaneously reducing unnecessary energy consumption. In this regard, the literature suggests that semi-continuous mixing is more effective in increasing biogas yield compared to fully continuous and intermittent mixing methods. However, existing studies are generally limited to specific speeds and durations and do not focus on the dynamic variation of mixing parameters. In this study, the mixing process is performed at varying speeds in a chaotic manner, facilitating more effective mixing of solid-liquid phases and contributing to the efficiency of biochemical reactions.

Research on chaotic mixing methods has demonstrated that irregular flow patterns improve mass transfer and ensure a more balanced distribution of substrates within the reactor. However, a comprehensive study on the systematic application of chaotic mixing in biogas production is lacking in the literature. This study proposes a hybrid mixer design and a mixing process controlled by variable speeds, aiming to minimize energy consumption while enhancing biogas production efficiency. Thus, an innovative approach is presented to improve the performance of biogas digesters, addressing a significant gap in the literature. In addition various studies have been conducted on remote control and IoT-based data collection systems. These studies are considered to contribute to the more efficient and comprehensive monitoring of the biogas production process (Demirsoy et al., 2024).

The structure of this paper is as follows: Section 2 provides a comprehensive overview of chaos theory and system design elements, followed by a summary of the experimental procedure steps. Section 3 presents the experimental results, including their evaluation and discussion. Finally, Section 4 summarizes the findings and offers recommendations for future research.

2. Materials and Methods

In this section, a general overview of chaos theory will first be presented, followed by a detailed examination of the design and experimental procedure of the chaotic speed-controlled mixing system in biogas production.

2.1. Chaos Theory

Chaos theory is a field of research that examines the dynamics of nonlinear systems and analyzes the mathematical models of complex physical phenomena. The foundations of this theory were first established through Poincaré's work in astronomy and later gained increasing popularity with Lorenz's research in meteorology. Today, chaos theory is utilized across various scientific disciplines for the prediction and control of phenomena, and it is also widely applied in studies exploring the beneficial use of randomness in specific processes (Sarıkaya et al., 2024).

One of the most distinctive characteristics of chaotic systems is their extreme sensitivity to initial conditions. This sensitivity causes small differences in initial states to

lead to significant changes in system behavior over time. For example, in a double pendulum system, a slight variation in the position from which the system is released at t=0 can result in a completely different trajectory and oscillations at different frequencies. Due to their sensitivity to initial conditions, such systems exhibit a certain degree of randomness, making their long-term predictability highly limited. Chaotic systems display a unique dynamic structure that can be described as the "order within disorder." In this context, chaos is not entirely a state of disorder but rather a transitional form between order and randomness. In the literature, chaotic systems are generally categorized as one-dimensional chaotic maps and three-dimensional chaotic models. While chaotic maps typically involve discrete-time signals, three-dimensional chaotic models are characterized by continuous-time signals. Systems defined in higher dimensions are referred to as hyperchaotic systems (Hamida El Naser and Karayel, 2024). The mathematical framework provided by chaos theory is not limited to technical fields such as physics and engineering but is increasingly utilized in various disciplines, including economics, biology, ecology, and neuroscience. In this context, studies on the analysis and control of chaotic systems are expected to contribute to enhancing the predictability of these systems and enabling their more efficient management.

In the literature, several widely studied chaotic systems—including the Hadley, Halvorsen, Lorenz, and Sprott-A systems—will be used to control the mixing speed of the developed device. The mathematical models of these chaotic systems are presented in equations 1-4, respectively.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= ax - y^2 - z^2 + 2 \\ \dot{y} &= xy + bxz - y + 1 \\ \dot{z} &= cxy + xz - z \end{aligned} \tag{1}$$

The coefficients of the Hadley mathematical model presented in Equation 1 are $a = -0.25, b = -4, c = 4$ and with the initial conditions defined as $x(0) = 0, y(0) = 0 \; and \; z(0) = 1.3$.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= ax + by + cz - y^2 \\ \dot{y} &= ay + bz + cx - z^2 \\ \dot{z} &= az + bx + cy - x^2 \end{aligned} \tag{2}$$

The coefficients of the Halvorsen mathematical model presented in Equation 2 are $a = -1.27, b = -4, c = -4$ and with the initial conditions defined as $x(0) = -5, y(0) = 0 \; and \; z(0) = 0$.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y - x) \\ \dot{y} &= x(b - z) - y \\ \dot{z} &= xy + cz \end{aligned} \tag{3}$$

The coefficients of the Lorenz mathematical model presented in Equation 3 are $a = 10, b = 28, c = -8/3$ with the initial conditions defined as $x(0) = 0, y(0) = -0.1 \; and \; z(0) = 9$.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= -x + y.z \\ \dot{z} &= 1 - y^2 \end{aligned} \tag{4}$$

The initial conditions of the Sprott-A mathematical model presented in Equation 4 are defined as $x(0) = 0, y(0) = 0.5 \; and \; z(0) = 0$.

Chaotic phase portraits will be applied to the asynchronous motor operating in the frequency range of 0 to 50 Hz and normalized within the range of -25 to +25. The phase portraits of the chaotic system equations presented above are shown in Figure 1 for Hadley, Figure 2 for Halvorsen, Figure 3 for Lorenz, and Figure 4 for Sprott-A.

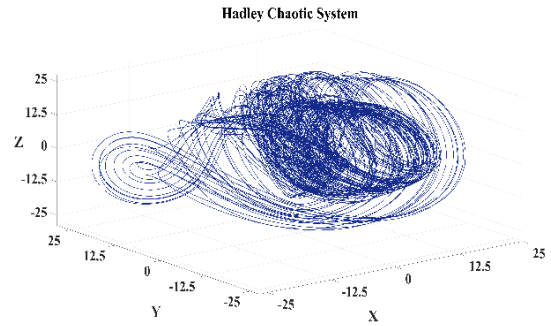


Figure 1. Phase portrait of the hadley chaotic system.

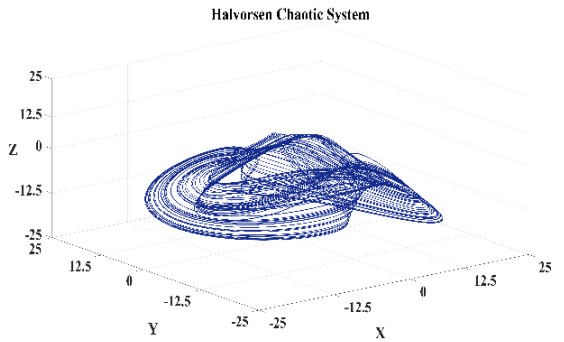


Figure 2. Phase portrait of the halvorsen chaotic system.

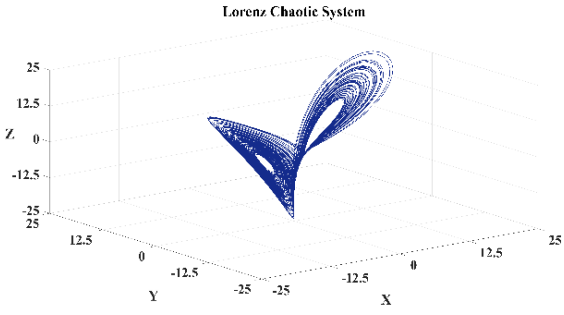


Figure 3. Phase portrait of the lorenz chaotic system.

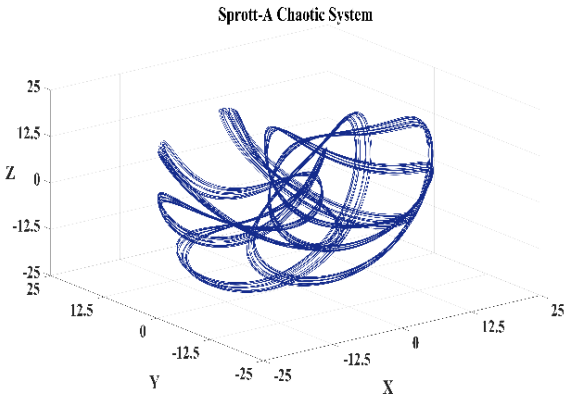


Figure 4. Phase portrait of the sprott-a chaotic system.

2.2. System Design

In this study, an integrated mixing system was designed to ensure optimal mixing conditions in the biogas production process. The system comprises various components to achieve a homogeneous substrate mixture and optimize biochemical processes. A 0.37 kW geared asynchronous motor drives the mixing mechanism, while an inverter-supported control mechanism is integrated to enhance the system's dynamic motion capability and ensure energy efficiency.

Within the mixing tank, a propeller-blade mixer was used to distribute the substrate evenly across all regions. The propeller blades facilitate the mixing process through a circular motion mechanism, ensuring homogeneous distribution of the substrate. A helical mixer extends from the bottom of the tank upwards, serving as a mechanism that enables both substrate transfer and continuous mixing. The helical shaft, driven by the motor, transports the substrate from the lower region to the upper region, thereby increasing mixing efficiency. The helical mixer, coupled to the reducer shaft, supports the vertical movement of the substrate, contributing to the homogenization process, while all system components are integrated to ensure effective mixing. The ability to adjust the mixing speed chaotically allows for dynamic adaptation to different mixing ratios and process requirements. For efficient management of automation processes, the system is integrated with a Programmable Logic Controller (PLC). The PLC enables the automatic control of mixing functions, analysis of process data, and determination of optimal operating parameters based on system conditions.

This system design has been developed to maximize efficiency, ensure energy savings, and achieve homogeneous substrate distribution in the mixing process, offering a comprehensive structure aimed at enhancing the effectiveness of biogas production.

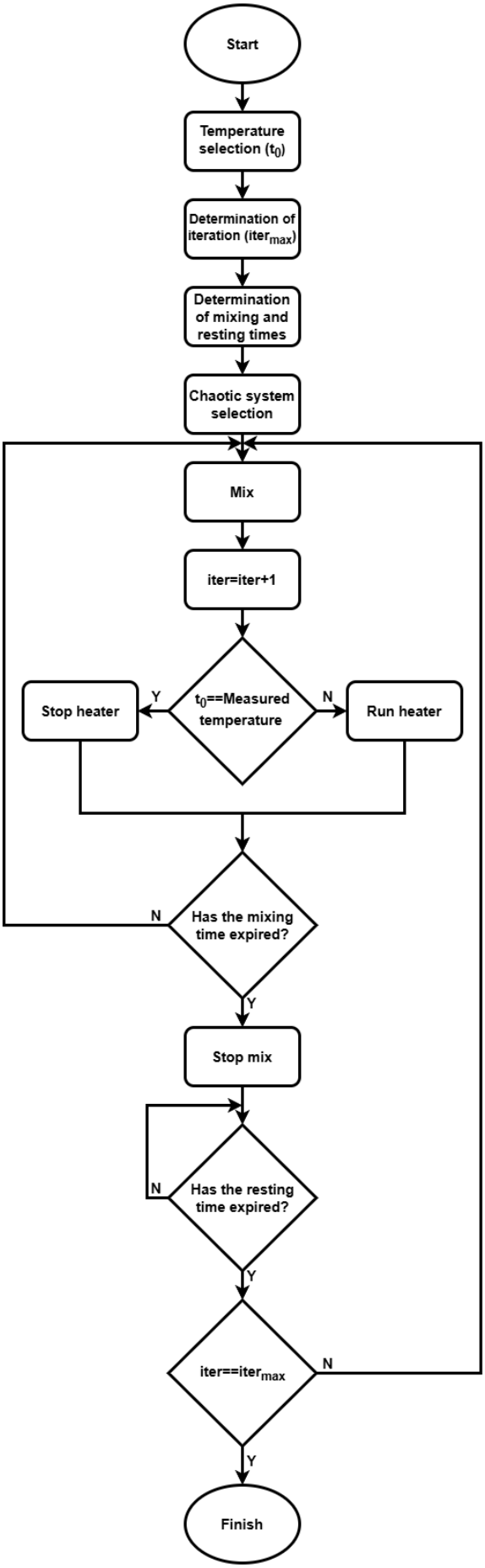


Figure 5. Flowchart.

The flow diagram shown in Figure 5 represents a systematic control algorithm that regulates the mixing and temperature control mechanism in the biogas production process. The process begins with the determination of the initial experimental parameters and continues with mixing-rest cycles, repeating until a predefined number of iterations is reached. During the mixing phase, the system periodically updates the chaotic speed, establishing a dynamic and variable speed profile. Once the mixing duration is completed, the process transitions into the resting phase, and this iterative mechanism continues until the maximum number of iterations is reached. Thus, instead of maintaining a fixed speed profile, a continuously variable and chaotic speed control strategy is implemented, ensuring the adaptive and dynamic nature of the process.

The system first operates by determining the initial temperature (t_0). Subsequently, the maximum number of iterations ($iter_{max}$) to be applied during the experiment, as well as the mixing and resting durations, are defined. Additionally, one of the chaotic mixing systems used in biogas production is selected to determine the mixing method. Once the process is initiated with the defined parameters, the mixing operation is activated, and at the end of each iteration, the iteration counter is incremented. At this stage, the measured temperature (t_{0m}) is compared with the initial temperature. If the measured temperature is equal to the initial temperature, the heater is turned off; however, if the temperature falls below the desired value, the heater is activated. The mixing process continues until the predefined mixing duration is completed, after which the mixer is stopped.

Following this, the resting phase begins, and the system enters standby mode until the predetermined resting duration is completed. Once the resting period ends, the iteration count is checked. If the current iteration count has not yet reached the maximum iteration limit, the process restarts, and the mixing operation is reinitiated. However, if the iteration count reaches the specified maximum value, the process is completed, and the system is terminated.

This structure has been developed to enable the automatic optimization of mixing durations and temperature balance in the biogas production process. The utilization of chaotic systems offers an approach aimed at enhancing the efficiency of biochemical processes and optimizing biogas production performance. Consequently, by dynamically controlling mixing duration, resting duration, and temperature variables, the system ensures the stable execution of the biogas production process.

2.3. Experimental Setup

In this study, experiments were conducted under controlled laboratory conditions to evaluate the effect of different mixing methods on efficiency in the biogas production process. The experimental system consists of a 100-liter mixing tank, an 80-liter manure-water mixture, and a 30-liter storage tank. A 1:1 manure-to-water ratio generally provides a suitable composition for biogas production. The viscosity of this mixture can range between 1 and 50 cP, while the total solids (TS) content varies between 5% and 12%. The mixture exhibits a manageable rheology in terms of mixability; however, its exact physical and chemical parameters should be determined based on the type of manure used and laboratory analyses. The organic substrate utilized in this study consists of cattle manure obtained from a consistent source, ensuring uniformity across all samples. Moreover, all experiments were conducted under comparable initial conditions to maintain experimental reliability and reproducibility. In the study, combustion durations were measured under constant flow rate conditions, and it was determined that an increase in the amount of produced gas extended the combustion duration. This can be explained by the fact that the increase in gas production ensures the continuity of the combustion process, thereby prolonging the combustion duration. Based on the obtained findings, the interaction between combustion duration, gas composition, and efficiency was comprehensively evaluated, and the possible mechanisms explaining this relationship were discussed in detail.

The experimental setup was prepared to contain the 80-liter manure-water mixture and tested under different temperature conditions for each mixing method. The first set of experiments was conducted at 20°C, while the second set was carried out at 30°C, ensuring equal operating conditions across all tests. The mixing process was applied 12 times per day for four days, with each session lasting 11 minutes. At the end of the fourth day, the biogas produced was discharged from the system, and the amount of biogas generated on the fifth day was measured and recorded. Each experimental set was repeated three times to enhance reliability, and the collected data was recorded and analyzed. Figure 6 illustrates the experimental setup.



Figure 6. Experimental setup.

The experimental setup, designed to evaluate the effectiveness of different mixing methods in the biogas production process, is shown in Figure 6. The system's main components are numbered, and the function of each component is structured in a specific order. The electrical panel, labeled as component 1, contains the PLC, inverter, and HMI (Human-Machine Interface) components, which enable system automation. These components are used to regulate system operating parameters, adjust mixing speed, and facilitate data monitoring. The mixing process is carried out by a geared asynchronous motor, labeled as component 2. This motor rotates the mixing shaft, ensuring the homogeneous mixing of the substrate. The mixing tank, where the fermentation process takes place, is labeled as component 3 and is sealed with a silicone-based insulation material to ensure gas tightness. To analyze biogas production under different temperature conditions, the tank is equipped with a heating system. The overall system control and data recording are managed by a computer, labeled as component 4. Integrated with the PLC and other automation components, the computer enables the monitoring and management of all parameters throughout the experimental process. The collection of biogas within the experimental setup is carried out using tanks labeled as components 5 and 6. The initial state of tank 5 contains 30 liters of water, while tank 6 starts empty. Additionally, a discharge outlet located at the lower level of tank 5 is connected to tank 6, which is positioned at a higher elevation. During biogas production, the gas generated in the mixing tank is transferred into tank 5. Over time, the pressure generated by the accumulating biogas in tank 5 alters the water level, causing water to move into tank 6. As a result of this process, compressed biogas accumulates in tank 5, creating a suitable environment for gas storage and measurement. This mechanism is designed to dynamically monitor gas pressure during biogas production and ensure the efficient storage of biogas.

This experimental setup has been developed to examine the impact of mixing methods and temperature variations on the efficiency of biogas production processes. All system components contribute to optimizing biogas production, systematically evaluating the collected data, and determining the effects of various variables on the process.

3. Results and Discussions

This study evaluated the effect of chaotic mixing methods on biogas production efficiency and provided a comparative analysis of these methods against fixed-speed mixing. The experiments were conducted at temperature conditions of 20°C and 30°C, and the amount of biogas produced, along with key performance indicators such as combustion duration, was analyzed. As presented in Table 1, in the experiments conducted at 20°C, it was determined that the fixed-speed mixing method resulted in an average methane production of 16 L/day, whereas chaotic mixing methods improved biogas efficiency to varying degrees. Specifically, the Chaotic Lorenz method achieved a methane production of 17 L/day, while the Chaotic Sprott-A method yielded 18 L/day. This indicates that chaotic mixing methods facilitate more effective substrate homogenization and enhance biochemical processes, thereby increasing methane production. Furthermore, an analysis of combustion duration revealed that biogas obtained through fixed-speed mixing exhibited a combustion time of 555 seconds, whereas the Chaotic Sprott-A method provided the longest combustion duration at 655 seconds. This finding suggests that the Chaotic Sprott-A method may enhance biogas yield.

Table 1. Chaotic mixing and fixed-speed 20°C experiment

Mixing Method	Methane (Day/L)	Burning Time (sec)	Temperature
Chaotic Hadley	16±1	584±16	20^0C
Chaotic Halvorsen	16±1	568±22	20^0C
Chaotic Lorenz	17±1	610±21	20^0C
Chaotic Sprott-A	18±1	655±19	20^0C
Constant Velocity	16±1	555±9	20^0C

The experiments conducted at 30°C, as presented in Table 2, revealed that an increase in temperature enhanced biogas production across all methods. While the fixed-speed mixing method resulted in a methane production of 20 L/day, the Chaotic Hadley and Chaotic Lorenz methods produced 21 L/day, and the Chaotic Sprott-A method achieved 22 L/day. These findings indicate that temperature increases act as a catalyst in biogas production processes and that higher efficiency can be achieved when combined with chaotic mixing methods. In terms of combustion duration, biogas obtained through the fixed-speed mixing method exhibited a combustion time of 740 seconds, whereas biogas produced using the Chaotic Sprott-A method had a significantly longer combustion duration of 829 seconds. Figure 7 presents a graphical representation of the biogas volume and combustion duration for different mixing methods at 20°C, while Figure 8 illustrates the corresponding data for 30°C.

The tolerance margins in the combustion time values presented in Table 1 and Table 2 reflect the data obtained from three independent repetitions conducted for each experimental condition. Although the same environmental and operational parameters were maintained during the experiments, certain variability was observed due to possible uncertainties inherent in the system and measurement errors. In this context, the combustion times specified for each methodology were calculated as the average of three repetitions, while the

tolerance margins were determined based on the standard deviation of these measurements. This approach aims to account for potential random variations in the experimental process and enhance the statistical reliability of the obtained results.

Table 2. Chaotic mixing and fixed-speed 30°C experiment

Mixing Method	Methane (Day/L)	Burning Time (sec)	Temperature
Chaotic Hadley	21±1	752±24	30^{0}C
Chaotic Halvorsen	20±1	738±18	30^{0}C
Chaotic Lorenz	21±1	745±19	30^{0}C
Chaotic Sprott-A	22±1	829±16	30^{0}C
Constant Velocity	20±1	740±13	30^{0}C

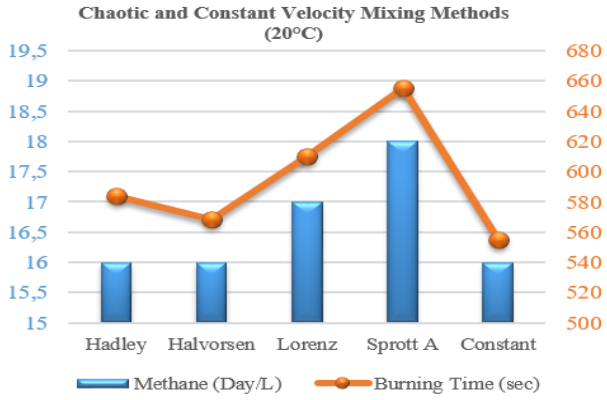


Figure 7. Comparison of methane gas production and combustion duration in 20^{0}C chaotic and constant speed mixing methods.

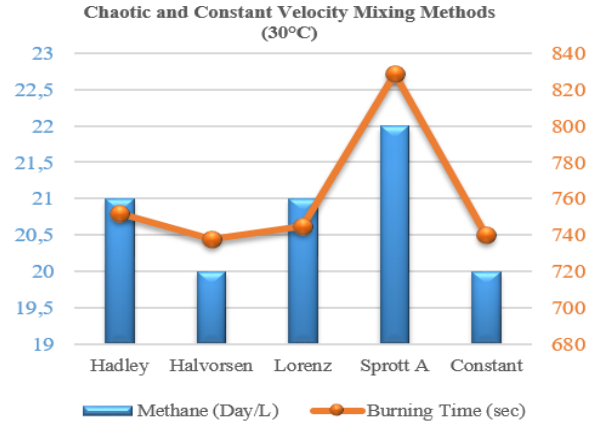


Figure 8. Comparison of methane gas production and combustion duration in 30^{0}C chaotic and constant speed mixing methods.

In both experiments, the Chaotic Sprott-A method achieved the highest biogas production efficiency and provided the longest combustion duration. This result indicates that chaotic mixing based on the Sprott-A equation is one of the most effective mechanisms for ensuring homogeneous substrate distribution and is a viable method for biogas production processes. Additionally, while temperature increases enhanced methane production across all methods, it was observed that chaotic methods optimized this increase more effectively.

In conclusion, different chaotic mixing methods extended the combustion duration of the produced biogas compared to fixed-speed mixing, with the Sprott-A method achieving an approximately 11% increase. Notably, the Chaotic Sprott-A method demonstrated the highest performance in terms of biogas production and yielded the best results in combustion duration, which determines the energy value of biogas. These findings highlight the effectiveness and potential of chaotic mixing methods in biogas production processes, presenting them as a significant alternative for industrial applications.

4. Conclusion

This study investigated the impact of chaotic mixing methods on biogas production efficiency and compared their effectiveness with conventional fixed-speed mixing. The experiments were conducted at 20°C and 30°C, and key performance indicators such as daily methane yield and combustion duration were analyzed to evaluate the efficiency of different mixing approaches. The findings demonstrated that chaotic mixing methods improved biogas production compared to fixed-speed mixing, with the Chaotic Sprott-A method achieving the highest methane production and the longest combustion duration under both temperature conditions. The results indicate that temperature acts as a catalytic factor in biogas production and that chaotic mixing techniques enhance efficiency. Furthermore, the findings suggest that the Chaotic Sprott-A mixing method is the most effective approach, providing both higher methane production and extended combustion duration, making it a promising technique for improving the performance of anaerobic digestion systems.

Future research should focus on the scalability of chaotic mixing techniques in larger biogas reactors, assess their applicability across different substrate types and reactor designs, and further validate their potential for real-world applications by investigating their effectiveness with various organic feedstocks.

Author Contributions

The percentages of authors' contributions are given below. All authors have reviewed and approved the article.

	M.S.S.	M.S.D.	M.Ç.K.
C	50	40	10
D	40	40	20
S	20	20	60
DCP	40	50	10
DAI	50	40	10
L	50	30	20
W	40	50	10
CR	40	40	20
SR	50	40	10
PM	15	15	70
FA	15	15	70

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest in this study.

Ethical Approval Statement

Since this study did not involve any studies on animals or humans, ethics committee approval was not obtained.

Acknowledgements

This research was supported by Turkish Research Council (Project No: 2220416).

References

Boesinger C, Le Guer Y, Mory M. 2005. Experimental study of reactive chaotic flows in tubular reactors. AIChE J, 51(8): 2122-2132.

Demirsoy MS, El Naser YH, Sarıkaya MS, Peker NY, Kutlu M. 2024. Development of elbow rehabilitation device with iterative learning control and internet of things. Turk J Eng, 8(2): 370-379.

Gbadeyan OJ, Muthivhi J, Linganiso LZ, Deenadayalu N, Alabi OO. 2024. Biogas production and techno-economic feasibility studies of setting up household biogas technology in Africa: A critical review. Energy Sci Eng, 12(10): 4788-4806.

Hamida El Naser Y, Karayel D. 2024. Modeling the effects of external oscillations on mucus clearance in obstructed airways. Biomech Model Mechanobiol, 23(1): 335-348.

Kabeyi MJB, Olanrewaju O. 2022. Optimum biodigestor design and operations. In: Fifth European Conference on Industrial Engineering and Operations Management, July 26-28, Rome, Italy, pp: 424.

Kalayci O, Pehlivan I, Akgul A, Coskun S, Kurt E. 2021. A new chaotic mixer design based on the Delta robot and its experimental studies. Math Probl Eng, 2021(1): 6615856.

Kapłan M, Klimek K, Syrotyuk S, Konieczny R, Jura B, Smoliński A, Wałowski G. 2021. Raw biogas desulphurization using the adsorption-absorption technique for a pilot production of agricultural biogas from pig slurry in Poland. Energies, 14(18): 5929.

Kashfi ME, Kouhikamali R, Khayati G. 2021. The effect of mixing rate on performance of anaerobic reactor in methane production. Iran J Energy Environ, 12(3): 209-219.

Lemmer A, Naegele HJ, Sondermann J. 2013. How efficient are agitators in biogas digesters? Determination of the efficiency of submersible motor mixers and incline agitators by measuring nutrient distribution in full-scale agricultural biogas digesters. Energies, 6(12): 6255-6273.

Mahmoodi-Eshkaftaki M, Rahmanian-Koushkaki H. 2022. Multi-objective optimization of pneumatic mixing systems for anaerobic digesters: A hybrid technique of statistical modeling and numerical simulations. Waste Biomass Valoriz, 13(6): 2815-2830.

Martí-Herrero J, Alvarez R, Rojas MR, Aliaga L, Céspedes R, Carbonell J. 2014. Improvement through low cost biofilm carrier in anaerobic tubular digestion in cold climate regions. Bioresour Technol, 167: 87-93.

Mousa H, Obaidat A, Khaled HB, Alawaneh A, Tarawneh A. 2016. Experimental investigation of biogas production from kitchen waste mixed with chicken manure. J Eng Res, 13(2): 115-123.

Obileke K, Mamphweli S, Meyer EL, Makaka G, Nwokolo N. 2020. Design and fabrication of a plastic biogas digester for the production of biogas from cow dung. J Eng, 2020(1): 1848714.

Obileke K, Onyeaka H, Nwokolo N. 2021. Materials for the design and construction of household biogas digesters for biogas production: A review. Int J Energy Res, 45(3): 3761-3779.

Rajendran K, Aslanzadeh S, Taherzadeh MJ. 2012. Household biogas digesters A review. Energies, 5(8): 2911-2942.

Sarıkaya MS, Hamida El Naser Y, Kaçar S, Yazıcı İ, Derdiyok A. 2024. Chaotic-based improved Henry gas solubility optimization algorithm: Application to electric motor control. Symmetry, 16(11): 1435.

Sebayuana K, Nindhia TGT, Surata IW, Nindhia TS, Shukla SK, Khanal SK. 2021. Performance of 500-liter stainless steel portable biogas anaerobic digester with agitator designed for the tropical developing country. Key Eng Mater, 877: 160-165.

Shapovalov YB, Salavor OM, Yakymenko IL. 2023. The economic potential of enhanced method of anaerobic fermentation with green ammonia production for European energy market. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, October, 20, Online, pp: 012025.

Singh B, Kovács KL, Bagi Z, Nyári J, Szepesi GL, Petrik M, Szamosi Z. 2021. Enhancing efficiency of anaerobic digestion by optimization of mixing regimes using helical ribbon impeller. Fermentation, 7(4): 251.

Singh B, Singh N, Čonka Z, Kolcun M, Siménfalvi Z, Péter Z, Szamosi Z. 2021. Critical analysis of methods adopted for evaluation of mixing efficiency in an anaerobic digester. Sustainability, 13(12): 6668.

Spodoba MO, Zablodskiy MM. 2021. Залежність енергетичних витрат від типу використаної механічної мішалки у біогазовому реакторі. Electr Eng Power Eng, (1): 26-33.

TabkhPaz M, Mahmoodi M, Arjmand M, Sundararaj U, Chu J, Park SS. 2015. Investigation of chaotic mixing for MWCNT/polymer composites. Macromol Mater Eng, 300(5): 482-496.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1620747

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)
Cilt 8 - Sayı 3: 680-694 / Mayıs 2025
(Volume 8 - Issue 3: 680-694 /May 2025)

YAPAY ZEKÂ UYGULAMALARININ İŞ SÜREÇLERİNE KATKISI

Songül DEMİRKAN[1]*

[1]*Kirsehir Ahi Evran University, Vocational School of Social Sciences, 40000, Kırşehir, Türkiye*

Özet: Bu çalışmanın amacı iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının etkilerini ulusal ve uluslararası alanyazındaki çalışmalara dayalı ve karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır. Sistematik literatür incelemesi metodolojisine dayalı olarak yürütülen çalışmada ulusal alanyazın için Dergipark veritabanı, uluslararası alanyazın ise Web of Science veritabanı üzerinden taranmıştır. Bu kapsamda "yapay zekâ" "iş süreçleri" "işletme" ve "yönetim" anahtar kelimeleriyle yapılan taramada ulusal veritabanından 14, uluslararası veritabanından 16 makale araştırmaya dahil edilmiştir. İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı eğitimden turizme geniş bir kullanım alanına ve karar vermeden pazarlama faaliyetlerine uzanan geniş kullanım amacına sahiptir. Bununla birlikte yapay zekâ uygulamalarının iş süreçlerine katkısı mevcut uygulamaların irdelenmesine dayanırken uluslararası alanyazında uygulamalardan ziyade temel teknolojilerin farklı bileşimleriyle özgün uygulamalar yaratılmasına odaklanılmaktadır. Bu yönüyle yapay zekâ uygulamalarının iş süreçlerine etkisine ilişkin uluslararası alanyazının eylem araştırması yöntemini benimsediği anlaşılmaktadır. Süreç tanımlama kapsamında iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının mevcut durumu insan ve organizasyon uyumu, rekabet ve işletme yönetimi, risk ve güvenlik yönetimi süreç takibi ve yönetimi, veri analizi ve güvenirliği temalarıyla ortaya konulmuştur. Uluslararası alanyazında iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı kaynakların etkin kullanımı, aksaklık ve hataların önlenmesi, süreç optimizasyonu ve iyileştirilmesi, esneklik ve çeviklik sağlanması amacıyla süreç geliştirme bakış açısıyla ele alınmaktadır. Döngüsel ekonomiyi güçlendirme, yoğun iş yükünü yönetilebilir hale getirme, verimliliği arttırma, veriye dayalı öngörülerde bulunma gibi birçok güçlü yönü ve atalet eğilimine neden olma, etik kavrama eksikliği, hukuki altyapının yetersiz olması gibi gelişime açık yönleri bulunmaktadır. İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı ulusal uluslararası düzeyde işbirliği ağı kurma ve inovasyon ekosistemine dahil olma gibi önemli fırsatları sunmakta; ancak, duygu empatiden yoksunluk, mahremiyet ihlali istihdamı tehdit etme gibi ciddi riskler barındırmaktadır. Söz konusu risklerin çözümü için politika yapıcı, işletme yöneticileri ve araştırmacılara düşen yapay zekâ kullanımının toplumsal kalkınma ve gelişmişlik düzeyine katkı sağlayacağı alanların belirlenmesi, insan ve organizasyonel uyumunun desteklenmesi, uygulamalara temel oluşturan disiplinler arası araştırmalar yapılması gibi sorumluluklar bulunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Yapay zekâ, İş süreçleri, İşletme, Yönetim

Contribution of Artificial Intelligence Applications to Business Processes

Abstract: This study aims to reveal the effects of artificial intelligence (AI) applications in business processes through a comparative analysis of national and international literature. A systematic literature review was conducted using the Dergipark database for national studies and the Web of Science database for international studies. The search included the keywords "artificial intelligence," "business processes," "business," and "management," resulting in 14 national and 16 international articles. The use of artificial intelligence in business processes has a wide range of applications, from education to tourism, and extends to various purposes, from decision-making to marketing activities. However, while the contribution of artificial intelligence applications to business processes is based on the examination of existing applications, the international literature focuses on creating original applications with different combinations of fundamental technologies rather than on applications. In this respect, it is understood that the international literature on the impact of artificial intelligence applications on business processes adopts the action research method. Within the scope of process identification, the current state of artificial intelligence usage in business processes has been presented through the themes of human and organizational alignment, competition and business management, risk and security management, process tracking and management, and data analysis and reliability. In the international literature, the use of artificial intelligence in business processes is addressed from the perspective of process development, aiming at the effective use of resources, prevention of disruptions and errors, process optimization and improvement, and ensuring flexibility and agility. It has many strengths such as strengthening the circular economy, making heavy workloads manageable, increasing efficiency, and providing data-driven insights, as well as areas for improvement such as causing inertia tendencies, lack of ethical understanding, and insufficient legal infrastructure. The use of artificial intelligence in business processes offers significant opportunities such as establishing a national and international cooperation network and integrating into the innovation ecosystem; however, it also carries serious risks such as lack of emotional empathy and privacy violations that threaten employment. To address these risks, policymakers, business managers, and researchers have responsibilities such as identifying areas where the use of artificial intelligence can contribute to social development and advancement, supporting human and organizational alignment, and conducting interdisciplinary research that forms the basis for applications.

Keywords: Artificial intelligence, Business process, Business, Management

***Sorumlu yazar (Corresponding author):** Kirsehir Ahi Evran University, Vocational School of Social Sciences, 40000, Kirsehir, Türkiye
E mail: songul.demirkan@ahievran.edu.tr (S.DEMIRKAN)
Songül DEMİRKAN https://orcid.org/0000-0001-9198-5869

Gönderi: 15 Ocak 2025 **Received:** January 15, 2025
Kabul: 15 Mart 2025 **Accepted:** March 15, 2025
Yayınlanma: 15 Mayıs 2025 **Published:** May 15, 2025

Cite as: Demirkan S. 2025. Contribution of artificial intelligence applications to business proceses. BSJ Eng Sci, 8(3): 680-694.

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

1. Giriş

Yapay zekâ 21. Yüzyılla birlikte gelişimi hız kazanan güncel bir teknolojidir. Yapay zekâ toplumsal, örgütsel ve sosyal hayatta köklü değişimleri beraberinde getirmekte; eğitim, sağlık, mühendislik, yönetim gibi birçok farklı disiplinde alışılagelmiş ilke ve kuralları baştan yazmaktadır. Yapay zekâ teknolojilerindeki gelişmelere dayalı olarak ilke ve kurallarında köklü değişimler gerçekleşen ve örgütsel hayatı oldukça farklılaştıran alanlardan biri iş süreçleridir. İş süreçleri en yalın haliyle ürün veya hizmet üretmek amacıyla yürütülen bir dizi faaliyet olarak nitelendirilmektedir (Koçel, 2018; Gailly vd., 2014; Milani, 2019). İş süreçleri tedarik, üretim, pazarlama, finansman ve yönetim fonksiyonlarının yerine getirilmesinde anahtar rol oynamakta, işletmenin rekabet gücünü ve negatif entropi düzeyini belirlemektedir. İş süreçlerinin etkinlik ve verimliliğine önemli katkıda bulunan yapay zekâ teknolojileri arasında otomasyon, modelleme ve büyük veri analizi bulunmaktadır (Brynjolfsson ve McAfee, 2017). Otomasyon iş süreçlerinin daha kısa zamanda ve kaliteli yürütülmesini, modelleme stratejik konumlanmayı (Gladilin, 2023) büyük veri analizi ise etkin karar alınmasını (Edilia ve Larasati, 2023) kolaylaştırmaktadır. Ancak işletmenin kendine özgü yapısı, yapay zekânın karmaşıklığı ve temininin maliyetli oluşu, çalışanların gereken yetkinliğe sahip olmaması vb. yapay zekânın potansiyelinin tam anlamıyla kullanılamamasına neden olmaktadır (Jarrahi, 2018). Bununla birlikte iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı çeşitli etik ve güvenlik sorunlarına neden olmakta, uygulamada kopukluklara neden olmaktadır (Jobin vd., 2019; Mittelstadt, 2019). Bu kapsamda araştırmanın amacı yayınlanan yapay zekâ makaleleri üzerinden işletmelerde yapay zekâ kullanımının iş süreçlerine katkısını ortaya koymaktır.

2. Materyal ve Yöntem

Araştırmada sistematik literatür incelemesi metodolojisi benimsenmiştir. Sistematik literatür incelemesi ölçütlere dayalı olarak belirlenen araştırma bulgularının değerlendirilerek sentezlenmesine dayanmaktadır. Belirli bir konuya ilişkin mevcut bilgi birikimini ortaya koyan sistematik literatür incelemesi alandaki boşlukları belirlemekte, sonraki araştırmalara yön vermektedir (Cooper vd., 2018). Sistematik literatür incelemesi süreci (1) araştırma sorusunun belirlenmesi, (2) protokol geliştirilmesi, (3) kapsamlı literatür incelemesi, (4) çalışmaların seçilmesi, (5) veri analizi, (6) kalite değerlendirmesi, (7) sentez ve
(8) raporlanma aşamalarından oluşmaktadır. Sistematik literatür incelemesinin niteliğini araştırma sorusu, güvenirliğini protokol belirlemektedir. Bu nedenle araştırma sorusu ve protokolün açıkça ortaya konulması önem arz etmektedir (Higgins ve Green, 2011; Kitchenham, 2007; Petticrew ve Roberts, 2006). Araştırmada "Yapay zekâ uygulamaları iş süreçlerini nasıl etkilemektedir?" sorusuna cevap aranmaktadır. Bu amaç doğrultusunda iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının kullanımına yönelik çalışmalar araştırma kapsamına alınmıştır. Araştırma protokolüne ilişkin detaylar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Araştırma Protokolü

Protokol Maddeleri	Açıklama
Kullanılan Veri Tabanı	DergiPark ve Web of Science
Dergipark'ta Kullanılan Anahtar Kelimeler	"Yapay zekâ", "İş süreçleri", "İşletme" "Yönetim"
Web of Science'ta Kullanılan Kelimeler	"artificial intelligence" "business process" "business" management"
Çalışma Alanı	"İşletme", "Yönetim"
Çalışma Türü	Araştırma Makalesi
Çalışma Dili	Türkçe veya İngilizce
Bulguların Tasnifi	"Yazar, Yıl, Makale Adı"

Tablo 1'de görüldüğü gibi araştırmada veri olarak Dergipark ve Web of Science'ta aynı anahtar kelimelere sahip makaleler kullanılmıştır. Dergipark veritabanında yapılan taramada 37 araştırma makalesine, Web of Science veritabanında yapılan çalışmada ise 18 çalışmaya ulaşılmıştır. Araştırma kapsamına alınan makalelerin araştırma amacına hizmet etmesini sağlamak amacıyla uygulanan dâhil etme ve hariç tutma kriterleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Dâhil etme ve hariç tutma kriterleri

Dâhil Etme	Hariç Tutma
Makalenin tam metnine ulaşılabilmesi	Tam metnine ulaşılamayan makaleler hariç tutulur
İş süreçlerini kapsaması	İş süreçlerini kapsamayan makaleler hariç tutulur

Tablo 2'de görüldüğü gibi tam metnine ulaşılamayan ve iş süreçlerini kapsamayan makaleler araştırma kapsamı dışında bırakılmıştır. Dergipark veritabanından ulaşılan makalelerin tam metinleri detaylı olarak incelenmiş ve kriterleri karşılayan 14 makale analize dahil edilmiştir. Dergipark veritabanından ulaşılan makaleler Tablo 3'te bulunmaktadır.

Tablo 3'te görüldüğü gibi Dergipark veritabanında ulaşılan makaleler 2020 ve sonrasında yayınlanan çeşitli sektörlerde yürütülen araştırmalardan oluşmaktadır. Web of Science veritabanından ulaşılan makalelerin tam metinleri detaylı olarak incelenmiş ve kriterleri karşılayan 16 makale analize dahil edilmiştir. Tablo 4'te Web of Science veritabanından araştırma kapsamına alınan makaleler bulunmaktadır. Tablo 4'te görüldüğü gibi Web of Science veritabanından ulaşılan makaleler 2018 ve sonrasında yayınlanan iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımını farklı açılardan ele alan makalelerden oluşmaktadır. Sistematik literatür incelemesinin veri analizi aşamasında tümdengelim, tümevarım veya karma yaklaşım benimsenmektedir. Tümdengelim yaklaşımı verilerin genel teorilerden yola çıkarak analiz edilmesini, tümevarım ise verilerden yola çıkarak genel teorilere varılmasını amaçlamaktadır. Karma yaklaşımda ise öncelikle verilerin genel teorilerden yola çıkılarak analiz

edilmekte, ardından bulgulara dayalı olarak teori güncellenmektedir (Bandara vd., 2015; Thomas ve Harden, 2008). Yapay zekâ uygulamalarının iş süreçlerine etkilerini ortaya koymayı amaçlayan bu araştırmada tümevarım yaklaşımı benimsenmiş, makale bulgularından yola çıkılarak genel teoriye katkıda bulunulmuştur. Makaleler detaylı biçimde okunarak araştırma sorusuyla ilgili bölümler belirlenerek işaretlenmiştir. Kodlamalardan yola çıkılarak temalar ve kategoriler netleştirilmiştir. Analiz sonuçları araştırmanın güvenirliğinin arttırılması amacıyla iki bağımsız araştırmacıya gönderilerek tema kodlamaları istenmiş ve uzlaşma yüzdeleri aşağıdaki formülle hesaplanmıştır (Miles ve Huberman, 1994): Uzlaşma Yüzdesi (P) = [Görüş Birliği (Na)] / Görüş Birliği (Na) + Görüş Ayrılığı (Nd) *x* 100. Buna göre %70 olması gereken uzlaşma yüzdeleri sırasıyla %98 ve %96 bulunmuş ve araştırmanın güvenilir olduğu kabul edilmiştir. Bulgular her bir tema için ayrı ayrı ele alınarak belirlenen makalelere dayalı olarak güçlü ve gelişime açık yönleriyle yarattığı fırsat ve tehditler ortaya konulmuştur. Sonuç olarak yapay zekâ uygulamalarının iş süreçlerinin planlama, örgütleme, yöneltme, koordinasyon ve denetim faaliyetlerinde kullanımının etkileri ortaya konulmuş ve ileriye dönük önerilerde bulunulmuştur.

Tablo 3. Kriterleri sağlayan makaleler

Yazar	Yıl	Makale Adı
Balaban ve Kulular İbrahim	2023	ChatGPT gibi Sohbet Yazılımlarının Neden Olduğu Hukuka Aykırılıkların Önlenmesi
Ballı	2024	The Effect of Product Personalization on Consumer Purchasing Intention, Costumer Satisfaction, Brand Loyalty and Artificial Intelligence Applications with Machine Learning
Bayram ve Kaya	2023	The Contrubutions of Metaverse Technology on Management Information Systems in Strategic Planning and Decision-Making Process of Businesses
Çakılcı ve Öztürkoğlu	2021	Yeni Dijital Çağ Yaklaşımı ile Lojistik Sektöründe Yenilikçi Çözümler
Çevik ve Kayakuş	2020	Bilişim Teknolojileri Departmanında Kullanıcıların Taleplerine Cevap Verme Süresinin Makine Öğrenmesi ile Tahmin Edilmesi
Derici ve Doğan	2023	Forecasting Order Delays With Artificial İntelligence-Based Applications
Gülbaşı ve Karahan	2023	Finansal Sistemde Bilgi Teknolojileri ve Kullanımı
Güzel ve ark.	2022	Yapay Zekânın Sağlık Alanında Kullanımı: Nitel Bir Araştırma
Kurt ve Akçacı	2023	Endüstri 4.0 Uygulamalarının Tedarik Zinciri Performansına Etkisi
Okay	2023	Dijital Pazarlamada Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi Kullanımı
Özçetin	2024	Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0 Perspektiflerinde Muhasebe: Bir Teorik İnceleme
Salih	2024	Dijital Teknolojilerin İş Organizasyonlarındaki Dönüşüme Etkisi: Sosyal Politika Öğrencileri Perspektifinden Nitel Bir Araştırma
Yıldız ve Taşhan	2023	Yapay Zekâ: Bir Tehdit mi? Bir Yardımcı Mı? Tekstil Sektöründe Nitel Bir Araştırma
Yıldız, Yıldırım ve Kesici	2021	Düzce Bölgesindeki Firmaların Endüstri 4.0 Yaklaşımı

Tablo 4. Araştırma kapsamına alınan web of science makaleleri

Yazar	Yıl	Makale Adı
Abbasi vd.	2024	A rewiew of AI and machine learning contribution in business process management
Congès vd.	2024	R-IO SUITE: Integration of LLM-based AI into a knowledge management and model-driven based platform dedicated to crisis management
D'Amico vd.	2023	International Journal of Managerial and Financial Accounting
Dragoni vd.	2023	Supporting patients and clinicians during the breast cancer care path with AI: The Arianna solution
Guldner vd.	2023	A framework for AI-based self-adaptive cyber-physical process systems
Kampik vd.	2023	Large process models: a vision for business process management in the age of generative AI.
Kovshova vd.	2023	Improving the Efficiency of Intellectualisation Processes in Enterprise Management Systems
Mendling vd.	2018	How do Machine Learning, Robotic Process Automation, and Blockchains Affect the Human Factor in Business Process Management?
Muller vd.	2023	The effect of machine learning tools for evidence synthesis on resource use and time-to-completion: protocol for a retrospective pilot study
Nesterak vd.	2024	Workplace performance measurement: digitalization of work observation and analysis
Shahzad vd.	2020	Effective utilization of supervised learning techniques for process model matching.
Sohail vd.	2020	On Computing the Suitability of Non-Human Resources for Business Process Analysis
Sohail vd.	2021	Competency Driven Resource Evaluation Method for Business Process Intelligence
Szelagowski ve Sliz	2024	Toward BPM maturity assessment integrated with BPM implementation and use
Tafla vd.	2021	DIagnosys: An Analytical Framework for the Identification of Elementary School Students with Intellectual Disability
Tian vd.	2022	A machine learning-based human resources recruitment system for business process management using LSA, BERT and SVM

3. Bulgular

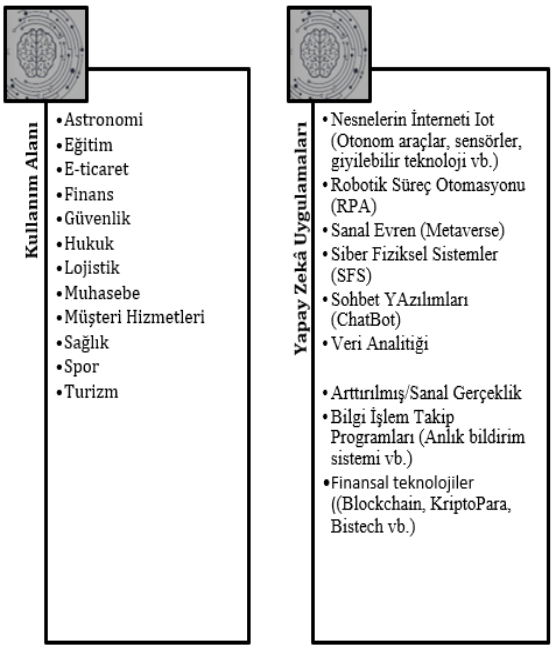
Araştırmanın bulguları ulusal ve uluslararası alanyazın bulguları başlıkları altında verilmiştir.

3.1. Ulusal Alanyazına Dayalı Bulgular

Ulusal alanyazına dayalı olarak elde edilen iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımına ilişkin bulgular alan, uygulama, amaç, güçlü yönler, gelişime açık yönler, fırsat ve tehditler temalarında sınıflandırılmıştır. Şekil 1'de ulusal alanyazında iş süreçlerinde yapay zekâ kullanım alanları ve uygulamaları verilmiştir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi yapay zekânın astronomiden turizme kadar uzanan geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. İş süreçlerinde kullanılan yapay zekâ uygulamaları arasında arttırılmış/sanal gerçeklik, bilgi işlem takip programları, finansal programlar, nesnelerin interneti (IoT), robotik süreç otomasyonu (RPA), sanal evren (metaverse), siber fiziksel sistemler (SFS), sohbet yazılımları (chatbot) ve veri analitiği bulunmaktadır. Şekil 2'de iş süreçlerinde yapay zekânın kullanım amaçları bulunmaktadır. Şekil 2'de iş süreçlerinde yapay zekânın kullanım amaçları bulunmaktadır.

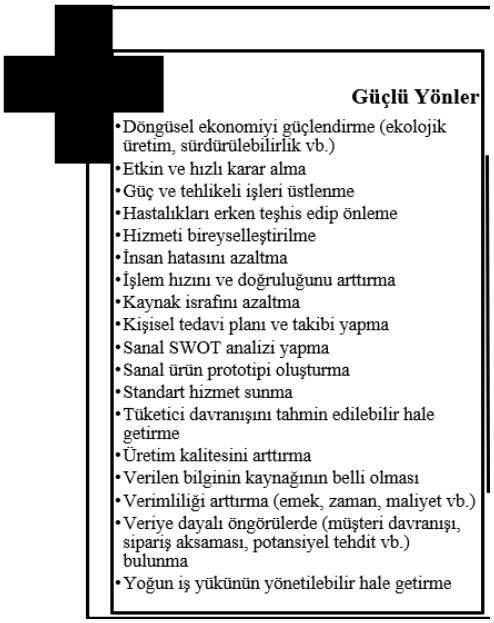
Şekil 2'de görüldüğü gibi iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının çağrı merkezi hizmeti verme, dosyalama arşivleme, envanter kontrolü, müşteri ilişkilerinin ve şikayetlerin yönetimi, yönetici asistanlığı gibi birçok farklı amaçla kullanıldığı görülmektedir. Şekil 3'te ulusal alanyazına göre iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının güçlü yanları bulunmaktadır.



Şekil 1. İş süreçlerinde yapay zekânın kullanım alanı ve uygulamaları.



Şekil 2. İş süreçlerinde yapay zekânın kullanım amaçları.

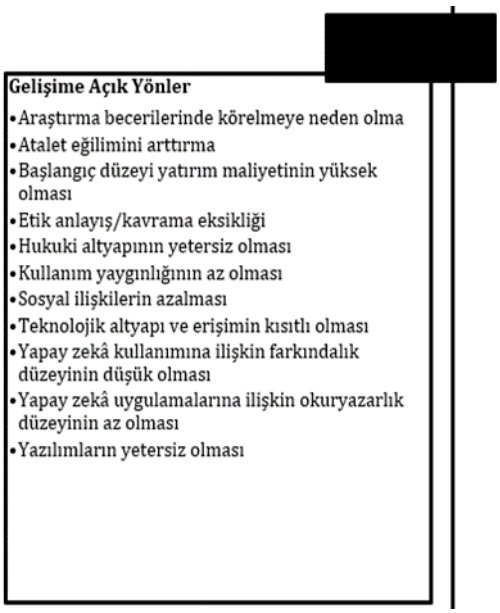


Şekil 3. İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının güçlü yönleri.

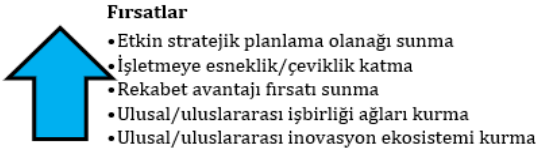
Şekil 3'te görüldüğü gibi iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının getirdiği güçlü yanları arasında döngüsel ekonomiyi güçlendirme, etkin ve hızlı karar alma, güç ve tehlikeli işleri üstlenme, hastalıkları erken teşhis edip önleme, hizmeti bireyselleştirme gibi pek çok avantaj bulunmaktadır. Şekil 4'te ulusal alanyazında iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının gelişime açık yönleri verilmiştir.

Şekil 4'te görüldüğü gibi iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının üretim kalitesini arttırma, sanal ürün prototipi hazırlama, kaynak israfını azaltma gibi güçlü yanları rekabet avantajı sağlama potansiyeline sahiptir. Öte yandan yapay zekânın özellikle etik kavrayıştan yoksun olması ve hukuki altyapının yetersizliği toplumsal yapıyı büyük ölçüde etkileme potansiyeline sahip sorunlara neden olmaktadır. Şekil 5'te ulusal alanyazında iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının sağladığı fırsatlara yer verilmiştir.

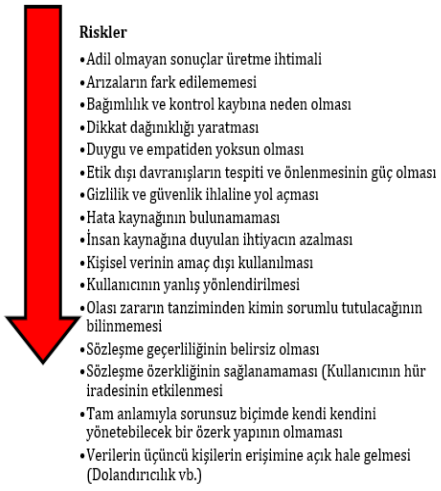
Şekil 5'te görüldüğü gibi ulusal alanyazında iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı etkin stratejik planlama yapma olanağı, işletmeye esneklik/çeviklik katma, rekabet avantajı fırsatı sunma, ulusal/uluslararası işbirliği ve inovasyon ekosistemi kurma fırsatları sunmaktadır. Şekil 6'da ulusal alanyazında iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının yarattığı riskler bulunmaktadır. Şekil 6'da görüldüğü gibi ulusal alanyazın iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının adil olmayan sonuçlar üretme, arızaların fark edilememesi, yapay zekâya bağımlılığın oluşması, kontrolün kaybedilmesi, duygu ve empatiden yoksun olması, etik dışı davranışların tespitinin ve önlenmesinin güç olması gibi ciddi olumsuz sonuçları beraberinde getirme potansiyeline sahip önemli riskler barındırmaktadır.



Şekil 4. İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının gelişime açık yönleri.



Şekil 5. İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının sağladığı fırsatlar.

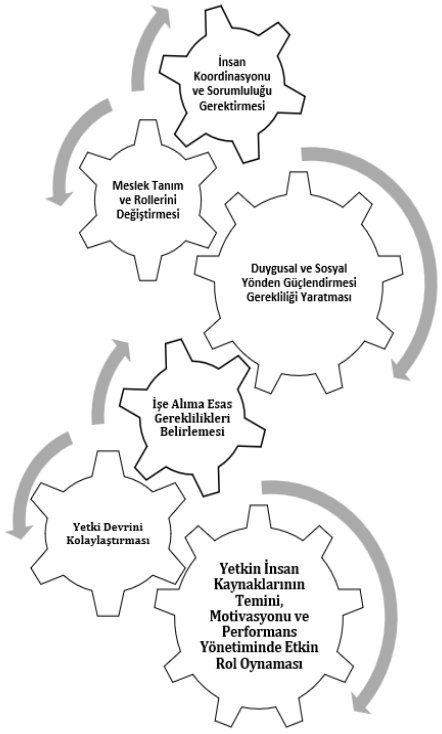


Şekil 6. İş Süreçlerinde yapay zekâ kullanımının yarattığı riskler.

İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının ulusal alanyazında SWOT analizi kapsamında ele alındığı görülmektedir. Stratejik bir planlama aracı olan SWOT analizi bir durumun güçlü, gelişime açık yönleri ile yarattığı fırsat ve riskleri ortaya koyarak kararların etkinliğini arttırmayı amaçlamaktadır (Çoban ve Karakaya, 2010; Gürel ve Tat, 2017).

3.2. Uluslararası Alanyazına Dayalı Bulgular

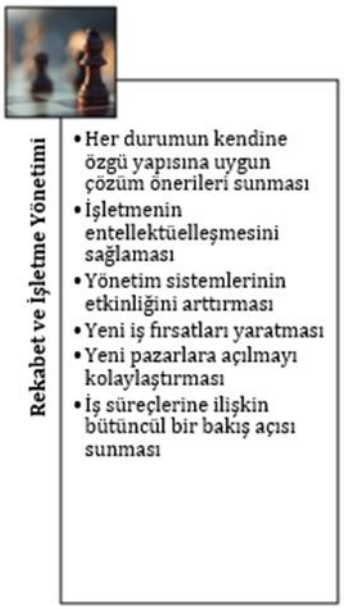
Uluslararası alanyazına dayalı olarak elde edilen yapay zekâ uygulamalarının iş süreçlerine katkısına ilişkin bulgular insan ve organizasyonel uyuma, rekabet ve yönetime, risk ve güvenlik yönetimine, süreç takibine, veri analizi ve güvenirliğe, verimliliğe, otomasyona, aksaklık ve hataların engellenmesine, sürekli iyileştirme ve optimizasyona, esneklik ve çevikliğe katkıları temalarında sınıflandırılmıştır. Şekil 7'de uluslararası alanyazında iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının insan ve organizasyonel uyuma katkılarına yer verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının yetki devrini kolaylaştırma, iş alım esaslarını belirleme, yetkin insan kaynaklarının temin motivasyon ve performans süreçlerinde etkin rol oynama vb. katkıları olduğu görülmektedir. Bununla birlikte iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının insan ve organizasyonel uyum bağlamında meslek tanım ve rollerini değiştirdiği, insan koordinasyon ve sorumluluğuna ihtiyaç duyduğu, duygusal ve sosyal yönden güçlendirilmesi gerektiği yönünde vurgular bulunmaktadır. Buradan hareketle iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının katkı düzeyinde insanın üstlendiği rolün belirleyici olduğu söylenebilir. Şekil 8'de uluslararası alanyazında iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının rekabet ve işletme yönetimine katkıları bulunmaktadır.



Şekil 7. İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının insan ve organizasyonel uyuma etkileri.

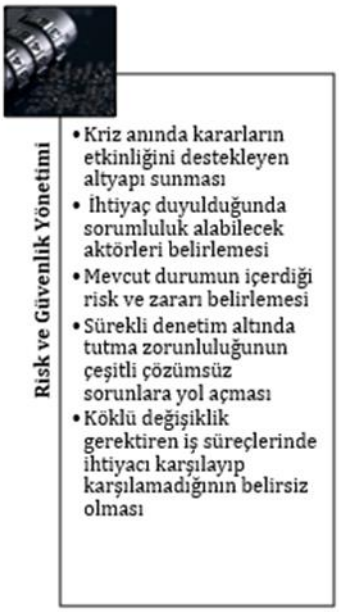
Şekil 8'de görüldüğü gibi iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamaları özgün çözüm önerileri sunmak, işletmenin entellektüelleşmesini sağlamak, yönetim sistemelrinin etkinliğini arttırmak, yeni iş fırsatları yaratmak, yeni

pazarlara açılmayı kolaylaştırmak, iş süreçlerine bütüncül bir bakış açısı sunmak. suretiyle rekabet ve işletme yönetimine katkıda bulunmaktadır.



Şekil 8. İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının rekabet ve işletme yönetimine etkileri.

Şekil 9'da uluslararası alanyazında iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının risk ve güvenlik yönetimine etkilerine yer verilmiştir.



Şekil 9. İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının risk ve güvenlik yönetimine etkileri

Şekil 9'da görüldüğü gibi kriz anlarında kararların etkinliğini destekleyen altyapı hizmeti sunmak, ihtiyaç duyulduğunda sorumluluk alabilecek aktörleri belirlemek, mevcut durumun içerdiği risk ve zararı belirlemek suretiyle risk ve güvenlik yönetimine katkıda bulunmaktadır. Ancak yapay zekânın sürekli denetim altında tutma zorunluluğunun yarattığı çeşitli çözümsüz sorunların yanında köklü değişiklik gerektiren iş süreçlerinde ihtiyacı karşılayıp karşılamadığına ilişkin belirsizlik bulunmaktadır. Şekil 10'da uluslararası alanyazında iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının süreç takibi ve yönetimine etkilerine yer verilmiştir.



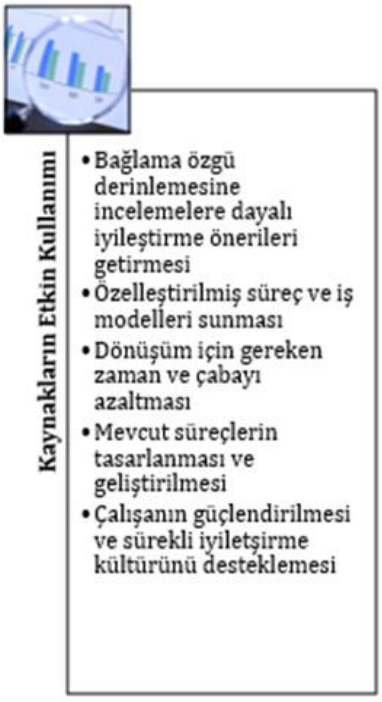
Şekil 10. İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının süreç takibi ve yönetimine etkileri.

Şekil 10'da görüldüğü gibi iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının sunduğu anlık müdahale, rutin işlerin takibi, veriye dayalı karar alma imkanı süreç takibi ve yönetimini kolaylaştırmaktadır. Ancak yapay zekâ uygulamalarının iş süreçlerinde kullanımı süreçlerin modellenmesi ve analizi ile örgüt süreçlerin tespiti noktasında aşılması gereken güçlükler barındırmaktadır. Şekil 11'de iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının veri analizi ve güvenilirliğe etkileri bulunmaktadır.



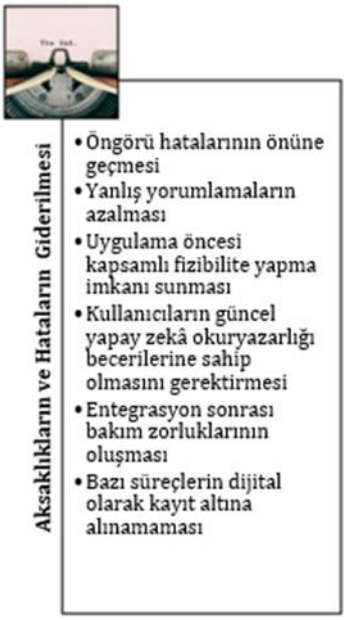
Şekil 11. İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının veri analizi ve güvenirliğine etkileri.

Şekil 11'e göre iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı verilerin geniş bir kaynak ağından toplanması, gözlem sonuçlarının güvenilir olması ve temel alınan verilerin anlın ve duruma özgü olması yönleriyle veri analizi ve güvenirliğe katkıda bulunmaktadır. Ancak iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının katkısının arttırılması için güçlü veri altyapısının sağlanması, doğrulama yönteminin yeterli hale getirilmesi, verilerin insan onayına ihtiyaç duymadan teyit edilmesi, kaynağın güvenirliği ve kalitesiyle ilgili ölçütlerin belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 12'de iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının kaynakların etkin kullanılmasına katkılarına yer verilmiştir. Şekil 12'de görüldüğü gibi iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı bağlama özgü derinlemesine incelemelere dayalı iyileştirme önerileri getirmek, özelleştirilmiş süreç ve iş modelleri sunmak, dönüşüm için gereken zaman ve çabayı azaltmak, mevcut süreçlerini tasarlamak ve geliştirmek, çalışanın güçlendirilmesini ve sürekli iyileştirme kültürünü desteklemek suretiyle kaynakların etkin kullanılmasını sağlamakta, verimliliği arttırmaktadır.



Şekil 12. İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının kaynakların etkin kullanımına etkileri.

Şekil 13'te iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının aksaklı ve hataların giderilmesine katkıları verilmiştir. Şekil 13'te görüldüğü gibi iş süreçlerine yapay zekâ kullanımı aksaklıkların ve hataların giderilmesine öngörü hatalarının önüne geçmek, yanlış yorumları azaltmak, uygulama öncesi fizibilite yapma olanağı sunmak suretiyle katkıda bulunmaktadır. Söz konusu katkının işlevselliği kullanıcıların güncel yapay zekâ okuryazarlığı becerilerine sahip olmasına, entegrasyon sonrası bakım sürecinin etkin yönetilmesine ve bazı süreçlerin dijital olarak kayıt altına alınamama durumuna alternatif çözümler getirilmesine bağlıdır. Şekil 14'te iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının süreç optimizasyonu ve sürekli iyileştirmeye getirdiği katkılara yer verilmiştir.



Şekil 13. İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının aksaklıkların ve hataların giderilmesine etkileri.



Şekil 14. İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının süreç optimizasyonu ve sürekli iyileştirmeye etkileri

Şekil 14'te görüldüğü gibi iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı süreç optimizasyonu ve sürekli iyileştirmeye sentetik veri setleriyle süreç analizi yapmak, mevcut uygulamalardan daha derin, etkili ve uygulanabilir içgörüler sunmak, saniye hassasiyetinde toplanan verilerle gözlemle elde edilemeyen detaylara ulaşmak, öngörücü analizlerle proaktif planlama yapmak, stratejik karar vermeyi ve organizasyonel dönüşümü desteklemek, faaliyetleri neden-ilişki-kaynak vb. detaylarıyla açığa çıkarmak suretiyle süreç optimizasyonu ve sürekli

iyileştirmeye katkıda bulunmaktadır. Şekil 15'te iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının esneklik ve çevikliğin sağlanmasına katkıları verilmiştir.



Şekil 15. İş süreçlerinde yapay zekâ esneklik ve çeviklik sağlanmasına etkileri.

Şekil 15'te görüldüğü gibi iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı esneklik ve çeviklik sağlanmasına çevresel ve sosyal bağlamları dikkate almak, farklı seviye ve ölçütlere uygun uygulanabilir öneriler getirmek, kişiselleştirilmiş hizmet sunmak, kriz anlarında duruma özgü, anlık uygulamalara olanak vermek ve çevre koruma, hareketlilik gibi acil sorunlara hızlı çözümler getirmek suretiyle katkıda bulunmaktadır. İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının uluslararası alanyazında süreç tanımlama ve geliştirme kapsamında ele alındığı görülmektedir. Süreç tanımlama işletme faaliyetlerine ilişkin süreçlerin tanımlanması, işletme amaçlarıyla uyumlu hale getirilmesi ve performans göstergesi oluşturularak etkin ve verimli biçimde uygulanmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte süreç tanımlama süreç geliştirmenin ilk aşamasıdır. Süreç geliştirme süreçlerin tanımlanmasının ardından ölçüm, analiz ve iyileştirmeden oluşan sistematik döngüdür (Özan, 2021). Uluslararası alanyazında iş süreçlerinin mevcut durumu insan ve organizasyonel uyum, rekabet ve işletme yönetimi, risk ve güvenlik yönetimi, süreç takibi ve yönetimi, veri analizi ve güvenilirlik başlıklarıyla ortaya konularak tanımlanmaktadır. Kaynakların etkin kullanımı, aksaklıkların ve hataların giderilmesi, süreç optimizasyonu ve sürekli iyileştirme, esneklik ve çeviklik sağlamaya odaklanılarak süreç iyileştirme çalışmaları yürütülmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Yapay zekâ uygulamalarının iş süreçlerine katkısı ulusal alanyazında konunun güçlü ve gelişime açık yönleriyle yarattığı fırsat ve riskleri açığa çıkaran SWOT analizi çerçevesinde ele alınırken uluslararası alanyazında süreç tanımlama ve süreç geliştirme kapsamında ele alınmaktadır. Bununla birlikte yapay zekâ uygulamalarının iş süreçlerine katkısı mevcut uygulamaların irdelenmesine dayanırken uluslararası alanyazında uygulamalardan ziyade temel teknolojilerin farklı bileşimleriyle özgün uygulamalar yaratılmasına odaklanılmaktadır. Bu yönüyle yapay zekâ uygulamalarının iş süreçlerine etkisine ilişkin uluslararası alanyazının eylem araştırması yöntemini benimsediği anlaşılmaktadır. Zira eylem araştırması belirli bir süreci uygulamaya dayalı olarak geliştirmeyi amaçlamaktadır (Balcı, 2015). Ulusal alanyazında öncelikle yapay zekâ uygulamalarının iş süreçlerine katkısı hangi uygulamaların kullanıldığına ilişkin bir durum tespiti gerçekleştirilmiştir. Ardından iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamaların güçlü ve gelişime açık yönleriyle yarattığı fırsat ve riskler ortaya konulmuştur. Arttırılmış/sanal gerçeklik, bilgi işlem takip programları, finansal programlar, nesnelerin internet (IoT), robotik süreç otomasyonu (RPA), sanal evren (metaverse), siber fiziksel sistemler (SFS), sohbet yazılımları (chatbot) ve veri analitiği iş süreçlerinde kullanılan yapay zekâ uygulamaları arasında öne çıkmaktadır. Arttırılmış/sanal gerçeklik kullanıcı deneyimini doğal ve akıcı hale getirerek zenginleştirmektedir. Arttırılmış gerçeklik gerçek dünya bilgilerinin dijitalleştirilmesine dayanırken sanal gerçeklik tamamen sanal bir dünya yaratılmasına dayanmaktadır (Şengün, 2024). Arttırılmış/sanal gerçeklik uygulamaları çoğunlukla eğitim ve pazarlama alanında kullanılmaktadır. Soyut kavramları somutlaştıran eğitimde arttırılmış/sanal gerçeklik uygulamaları öğrenme deneyimini zenginleştirmenin yanında kişiselleştirmektedir (Seçkin Kapucu ve Yıldırım, 2019). Pazarlamada arttırılmış/sanal gerçeklik uygulamaları ise tüketicilerin markaya ilişkin algı ve tutumunu şekillendirerek satın alma davranışını etkilemeektedir (Yüksel, 2017). İşletme faaliyetlerini sistematik olarak takip eden bilgi işlem takip programları olası aksaklık ve hataları tespit ederek otomatik olarak önleyerek verimlilikte kayda değer artış ve rekabet avantajı sağlamaktadır (Buyukarikan, 2022; Sabancı, 2023). İş süreçlerinde bilgi işlem takip programlarının kullanımı veri güvenliği ve entegrasyon zorluklarını beraberinde getirmektedir (Seun vd., 2023). Finansal programlar veri analizi, risk yönetimi gibi iş süreçlerinde kullanılmaktadır. İşlem hızını ve güvenliğini arttıran finansal programlar esnek ve müşteri odaklı hizmet sunulmasına imkan tanımaktadır (Bulazar ve Küçükçolak, 2021; Sari, 2024). Nesnelerin interneti (IoT) iş süreçlerinin yürütülmesinde kullanılan cihazların ağ üzerinden birbiriyle etkileşim kurmasına dayanan güncel bir yapay zekâ teknolojisidir. Nesnelerin internetinin temel amacı ağ üzerinden birbirine bağlanan basit

sensörler veya karmaşık makineler aracılığıyla işletmenin amacına hizmet eden tutarlı ve bütünleşik bir sistem oluşturmaktır. Böylelikle iş süreçlerinin yürütülmesinde etkin rol oynayan cihazların kontrolü ve etkin yönetimi mümkün olmaktadır (Madakam vd., 2015). Nesnelerin internetinin alandaki gelişmelere dayalı olarak dünyadaki tüm cihazları ortak bir altyapıda buluşturacağı ve çevreye ilişkin daha bütüncül ve kapsamlı bilgiler sunarak çevrenin kontrolünü kolaylaştıracağı yönünde görüşler bulunmaktadır (Li vd., 2014). Zamandan ve mekândan bağımsız olarak tüm nesneleri birbirine bağlamayı hedefleyen nesnelerin interneti işletmeler için çeşitli fırsatları ve zorlukları beraberinde getirmektedir (Lu vd., 2018). Zira işletmenin negatif entropi sağlamasında merkezi rol oynayan çevrenin kontrol altında tutulması iş süreçlerini köklü ve hızlı bir değişim sürecine girmesine neden olacaktır. Robotik süreç otomasyonu başta veri girişi, kayıt gibi rutin ve belirli bir kurala göre yürütülen görevler olmak üzere faaliyetlerin yürütülmesinde robot kullanarak iş sürecinin kendi kendine ilerlemesini sağlamaktadır. Böylelikle çalışanlar daha anlamlı ve karmaşık faaliyetlere odaklanma imkânı bulmakta, iş performansının artmasına katkıda bulunmaktadır. Ancak robotik süreç otomasyonunun performansa katkısına ilişkin belirli bir ölçüt olmadığından değerlendirme yapmak mümkün değildir. Robotik süreç otomasyonu genellikle işletmenin fizibilite ve girdi-çıktı verilerine dayalı süreçleri otomatikleştirmektedir (Farinha vd., 2023; Plattfaut ve Borghoff, 2022). Robotik süreç otomasyonunu performansına ilişkin belirsizlik olsa da iş süreçlerinin yönetilmesini kolaylaştırdığı anlaşılmaktadır. Kolektif sanal paylaşımlı alan anlamına gelen "metaverse" sanal dünyada fiziksel dünyanın kalıcı olarak temsil edilmesiyle oluşturulmuştur (Jenifer vd., 2023). Mobil tabanlı sürekli erişim ve sanal para birimiyle donatılan metaverse büyük verileri işletmekte, sanal deneyimler sunmaktadır (Huynh-The vd., 2022; Park ve Kim, 2022). Böylelikle işletmeler kararlarını gerçek dünyanın simüle edildiği sanal ortamda test etme imkanına sahip olmaktadır. Siber fiziksel sistemler nesnelere ilişkin gerçek zamanlı veri toplamasını, analiz etmesini ve tepki vermesini sağlayan yapılardır. Fiziksel sistemlerin dijital sistemlerle entegrasyonunu sağlayan siber fiziksel sistemler sensörlerden gelen verileri anlık olarak işlemekte, hızlı karar alınmasını sağlamaktadır. Akıllı şehirler, sağlık sistemleri ve otomotiv endüstrisi siber fiziksel sistemlerin kullanım alanları arasında yer almaktadır (Lee ve Seshia, 2016; Rajkumar vd., 2010). Yapay zekânın derin öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme teknolojisine dayanan sohbet robotları müşterilerin sorularına otomatik yanıtlar geliştirerek insana duyulan ihtiyacı azaltmaktadır. Sohbet robotları twitter, havayolu şirketlerinin seyahat bilgi sistemleri ve Ubuntu Dialog Corpora veri kümelerinden yoğun olarak yararlanmaktadır (Suhaili vd., 2021). Sobhet robotları işletmelerin halkla ilişkiler, tanıtım gibi süreçlerine katkıda bulunmaktadır. Büyük veri yığınlarının belirli bir amaç için analiz edilmesine dayanan veri analitiği etkin kararlar ve uygulamalara temel oluşturmakta, işletmelerin performansını büyük oranda arttırmaktadır (Gandomi ve Haider, 2015; Lee, 2017). Bu bağlamda sohbet robotları müşteri deneyimini kişiselleştirerek marka imajını güçlendirmekte ve stratejik kararlara temel oluşturmaktadır. İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının yaygınlaşması işletmelerin iş yapma biçimlerinde köklü değişikliklere sebep olması çalışan istihdamını büyük oranda azalttığı yönünde endişelere neden olmaktadır (Tekin ve Demirel, 2024). Bununla birlikte yapay zekâ iş süreçlerinin optimum düzeyde verimli kılınması suretiyle işletmenin negatif entropi sağlamasının yanında çevre dostu ürün ihtiyacının tespiti ve üretilmesi noktasında döngüsel ekonomiye önemli katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte yapay zekâ işletmenin inovasyon yeteneğini arttırma, sistem arızalarının hızla tespiti ve giderilmesi, üretimin esnek ve verimli kılınması, ürün ve hizmetlerin kişiselleştirilmesi, denetimin uzaktan yapılması gibi güçlü yanlarıyla işletme alanında köklü değişiklikleri tetiklemektedir. Ancak mevcut teknolojik altyapının yetersiz olması, yaşamın çeşitli alanlarındaki güncel gelişmelere ve toplumsal olaylara tepkinin azalması, yapay zekâ okuryazarlığının düşük olması gibi gelişime açık yönleri bulunmaktadır (Bulut vd., 2024; Elçiçek, 2024; Işık ve Çamur, 2024; Öztemel, 2020; Ünsal, 2024). İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı adil olmayan sonuçlar üretme, arızaların fark edilememesi, yapay zekâya bağımlılığın oluşması, kontrolün kaybedilmesi, duygu ve empatiden yoksun olması, etik dışı davranışların tespitinin ve önlenmesinin güç olması gibi ciddi olumsuz sonuçları beraberinde getirme potansiyeline sahip olan ciddi riskleri bulunmaktadır. Ancak yapay zekânın iş süreçlerinde kullanımı işletmenin karar süreçlerini iyileştirerek stratejik planlamanın etkinliğini arttırmaktadır. Bununla birlikte yapay zekânın getirdiği yeni iş yapma biçimleri ve dünya genelindeki etkin iletişim ağı alt yapısı inovasyon ekosisteminin kurulmasını ve katma değeri yüksek inovatif adımların atılmasını sağlamaktadır (Adewumi vd., 2024; Kaggwa vd., 2024). Bu bağlamda yapay zekânın getirdiği fırsatları etkin kullanma yetkinliğine sahip işletmeler geleceğin dünyasında söz sahibi olarak toplumun ekonomik, sosyal, kültürel vb. birçok alanda dönüşümünde öncü olacağı ortadadır. Yapay zekâ uygulamaları beraberinde getirdiği büyük avantajların yanında telafisi oldukça güç çeşitli sorunlara neden olma potansiyeline sahiptir. Yapay zekâ uygulamalarının büyük oranda kişisel ve hassas veri toplaması bilgi güvenliği ve mahremiyet bakımından ciddi bir tehdit kaynağıdır. Zira yapay zekâ kullandığı veri kaynakları aracılığıyla önyargılı ve etik dışı kararlar almayı da öğrenmesi mümkündür ve buna neden olan temel kaynağın tespiti çoğu zaman mümkün değildir. Bu noktada yapay zekâ kullanımıyla birlikte toplumsal olaylara verilen tepkinin azalması (Öztemel, 2020; Yeşilkaya, 2022) yapay zekânın yarattığı risklerde başa çıkma noktasında bireysel, örgütsel ve toplumsal düzeyde gereken sorumluluğun alınmayacağı kaygısına neden olmaktadır. Uluslararası alanyazında iş süreçlerinde

yapay zekâ uygulamaları süreç tanımlama ve süreç geliştirme yaklaşımıyla ele alınmaktadır. Süreç tanımlama kapsamında iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının mevcut durumu insan ve organizasyon uyumu, rekabet ve işletme yönetimi, risk ve güvenlik yönetimi süreç takibi ve yönetimi, veri analizi ve güvenirliği temalarıyla ortaya konulmuştur. İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı iş yapış biçimlerini farklılaştırarak öncekilerden oldukça farklı mesleki bilgi ve beceriler gerektirmektedir. Dolayısıyla mesleki tanım ve rollerin yanında işe alıma esas gereklilikleri değişmektedir. Bununla birlikte iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı yetki devrini kolaylaştırmakta; yetkin insan kaynaklarının temini, motivasyonu ve performans yönetiminde etkin rol oynamaktadır. Ancak iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının insan koordinasyonu ve sorumluluğunu zorunlu kılması, duygusal ve sosyal yönden güçlendirilmesi gerektirmesi aşılması gereken güçler arasındadır. Toprak vd. tarafından yürütülen insan kaynakları yönetiminde yapay zekâ kullanımına ilişkin çalışma araştırma sonuçlarıylma benzer biçimde dönüşüme için yeni beceriler elde edilmesi ve insan merkezli yapının korunması gerektiğini vurgulamaktadır. İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamaları işletme yönetiminin kolaylaşmasını ve rekabet avantajı kazanılmasını sağlamaktadır. Başta karar destek, otomasyon ve insan kaynakları yönetim sistemleri olmak üzere yapay zekâ tabanlı uygulamalar işletme yönetimini kolaylaştırarak stratejik alanlara daha fazla odaklanılmasını sağlamaktadır (Ünal ve Kılınç, 2020). Bununla birlikte yapay zekâ uygulamaları faaliyetleri hızlandırmak, hizmeti kişiselleştirmek, müşteri eğilimlerini öngörmek, üretim ve tedarik süreçlerini verimli kılmak suretiyle rekabet avantajı kazandırmaktadır (Karakulle ve Aktepe, 2023). İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı işletmenin risk ve güvenlik yönetimini sürekli denetim altında tutma zorunluğu nedeniyle güçleştirse de mevcut durumun içerdiği risk ve zararı belirlemesi, özellikle kriz anında etkin kararlar alınmasını sağlaması önemli avantajlar sağlamaktadır. Yapay zekâ uygulamalarının anlık veri toplama ve risk tespit etmesi, olası risklerin öngörmesi, insan kaynaklı hataları azaltması işletmenin risk yönetimini güçlendirmektedir (Motorcu ve Murat, 2021). Bununla birlikte yapay zekâ uygulamalarını güvenlik sistemleri bakımından ele alındığında ikircikli bir yapı ortaya çıkmaktadır. Yapay zekâ uygulamaları bir yandan işletmenin özerk savunma sistemleri kurarak güvenliğini desteklerken öte yandan siber saldırganların güvenlik açıklarını bulmak için kullanmasıyla tehdit unsuru haline gelmektedir (Efe, 2021). İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı süreç takibi ve yönetimini kolaylaştırmaktadır. Bu noktada iş süreçlerini analize dayalı olarak iyileştirmeyi amaçlayan süreç madenciliği ve faaliyetlerin otomasyonunu sağlayan robotik süreç otomasyonu iş süreçlerinde anahtar rol üstlenmektedir. Veri analizi ve güvenilirlik yapay zekâ uygulamalarının katkıda bulunduğu iş süreçlerinden biridir. Yapay zekâ destekli veri analizi uygulamaları iş süreçlerinde büyük veri yığınlarını işleyerek süreçlerin veriye dayalı ve şeffaf yürütülmesini sağlamaktadır. Veri analizine dayalı raporlar müşteri analitiği, finansal tahminler, tedarik zinciri yönetimi, siber güvenlik vb. alanlarda kullanılmaktadır (Kaushik, 2022). Uluslararası alanyazında iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı kaynakların etkin kullanımı, aksaklık ve hataların önlenmesi, süreç optimizasyonu ve iyileştirilmesi, esneklik ve çeviklik sağlanması amacıyla süreç geliştirme bakış açısıyla ele alınmaktadır. İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamaları kaynakların etkin kullanımını sağlamaktadır. Yapay zekâ uygulamaları rutin iş ve karar alma süreçlerini otomatikleştirerek daha az çabayla daha hızlı yerine getirmenin yanında kaynak kullanımını optimize etmektedir (Chan vd., 2022; Çetin, 2024; Doruköz ve Uslu, 2023). İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımıyla hataların tespiti ve öngörülmesi, sürecin kesintisiz devam etmesinin sağlamanın yanında kalitesini arttırmaktadır (Esposito vd., 2024; Parvin ve Parvin, 2023). Bununla birlikte iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamaları süreç optimizasyon ve sürekli iyileştirmeye önemli katkıda bulunmaktadır (Gülşen, 2019; Şahinaslan, 2023). Öte yandan duruma özgü etkin kararların hızlı ve anlık alınmasını sağlayan iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamaları işletmenin değişen çevre koşullarına uyumunu kolaylaştırmakta, stratejik yönetimi desteklemekte; örgütsel çevikliği güçlendirmektedir (Akturan, 2024; Mert, 2024). Görüldüğü gibi alanyazında uluslararası alanyazına dayalı olarak elde edilen araştırma sonuçlarını destekleyen çalışmalar bulunmaktadır.

İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımına ilişkin makaleler belirlenen ölçütler dahilinde tarandığında Dergipark veritabanında 37, Web of Science veritabanında 18 makaleye ulaşılmaktadır. Tam metnine ulaşılamayan ve iş süreçlerini kapsamayan makaleler çıkarıldığında makale sayısı ulusal alanyazında 14, uluslararası alanyazında 16'ya düşmektedir. Buradan hareketle iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının kullanımına ilişkin kısıtlı sayıda çalışma olduğu anlaşılmaktadır. Halbuki iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının kullanımına ilişkin çalışmalar yapay zekânın etkin ve verimli kullanmasını sağlayarak toplumsal kalkınma ve gelişmişliğe ivme kazandırma potansiyeline sahiptir. İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının eğitim, elektronik ticaret, finans, güvenlik, hukuk, lojistik, muhasebe, müşteri hizmetleri, sağlık, spor ve turizmden oluşan geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Bununla birlikte iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının ekonomi, iletişim, sanat, reklamcılık, sosyal hizmet gibi birçok farklı alanda kullanımı alanı olduğu ortadadır. Ancak Türkiye'de yapılan çalışmaları tarandığı Dergipark veritabanında, uluslararası alanyazında Web of Science veritabanında söz konusu alanlara ilişkin detaylı çalışmalara rastlanmamıştır. Buradan hareketle alanda iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımına ilişkin farklı alanları kapsayan çalışmalara ihtiyaç duyulduğu anlaşılmaktadır. Nitekim iş süreçlerinde yapay zekâ çağrı merkezi,

dosyalama arşivleme, envanter kontrolü, finansal işlemler, iş süreci takibi ve denetimi, müşteri ilişkilerinin ve şikayetlerinin yönetimi gibi birçok farklı amaçla kullanılmaktadır. İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı döngüsel ekonomiyi güçlendirmekte, etkin ve hızlı kararlar alınmasını sağlamakta, güç ve tehlikeli işleri üstlenmekte, işlem hızını ve doğruluğunu arttırmakta, üretim kalitesini arttırmakta, veriye dayalı öngörülerde bulunmakta ve verimliliği arttırmaktadır. Ancak iş süreçlerinde yapay zekânın araştırma becerilerini körelttiği, atalet eğilimini arttırdığı, başlangıç düzeyi yatırım maliyetlerinin yüksek olduğu, hukuki altyapısının yetersiz olduğu, etik anlayıştan yoksun olduğunu vurgulayan araştırmalar bulunmaktadır. Bununla birlikte yapay zekâ kullanımına ilişkin farkındalık ve okuryazarlık düzeyinin düşük olması, yazılım ve teknolojik altyapı yetersizliği iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının gelişime açık yönlerinden bazılarıdır. İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımı işletmelere etkin stratejik planlama, çeviklik, rekabet avantajı, ulusal ve uluslararası işbirliği ağı kurma, ulusal ve uluslararası inovasyon ekosistemlerine dahil olma fırsatları sunmaktadır. Ancak iş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının hata kaynağının tespit edilememesi, olası zararın tanziminden kimin sorumlu tutulacağının bilinmemesi, kişisel verilerin amaç dışı kullanılması, mahremiyet ve güvenliğini ihlal edilmesi, adil olmayan sonuçlar üretme ihtimalinin olması vb. ciddi olumsuz sonuçlar yaratma potansiyeline sahip riskleri bulunmaktadır. İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarına ilişkin uluslararası alanyazın ele alındığında yapay zekâ uygulamalarının iş süreçlerini yeniden şekillendirdiği anlaşılmaktadır. Bu noktada uluslararası alanyazında iş süreçlerinde kullanılan yapay zekâ uygulamalarının farklı kombinasyonlarının sürece yansımalarını ortaya koyma ve bu yansımaların işaret ettiği eksiklik ve aksaklıkları gidermeye odaklı çalışmalar yürütülmektedir. Söz konusu süreç tanımlama ve geliştirme uygulamaları iş yapış biçimlerini öncekinden oldukça farklı yeni bir bağlama taşımaktadır. İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamaları insan koordinasyon ve denetimini tamamen ortadan kaldırmamakta; aksine yapay zekânın duygusal ve sosyal yetkinliklerden yoksun olması çeşitli risk ve tehditler yaratmaktadır. Ancak yapay zekânın kendi kendine öğrenen yapısı tam anlamıyla denetim ve kontrol imkanı sunmamaktadır. Bu noktada iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının güvenlik sistemlerini proaktif olarak yapılandırması ve tehdit algılama mekanizmalarını güçlendirilmesi gerekmektedir. İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının sağladığı rekabet avantajının devamlılığı özgün ve yenilikçi adımların atılmasına bağlıdır. Bununla birlikte iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamaları çevre koşullarının yarattığı değişim baskısı altında olan işletmenin esnek ve çevik olmasını sağlamaktadır. Bu bağlamda yapay zekâ uygulamalarının iş süreçlerinde önemli katkılarının yanında getirdiği çeşitli riskler getirdiği anlaşılmaktadır. Yapay zekâ uygulamalarının iş süreçlerine getirdiği katkı ve neden olduğu risklerin dengelenmesi, etkin yönetilmesi doğrudan yapay zekâya bağlıdır. Zira iş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının potansiyelinin tam anlamıyla kullanılması ve yarattığı risklerin önlenmesinin önkoşulu yapay zekâ uygulamalarının geliştirilmesi ve stratejik anlamda etkin kullanılmasıdır. Araştırma sonuçları doğrultusunda politika yapıcılara, işletme yöneticilerine ve araştırmacılara yönelik öneriler geliştirilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre politika yapıcılara yönelik öneriler şu şekildedir:

- İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımının toplumsal kalkınma ve gelişmiş düzeyine kayda değer katkı sağlayacağı öncelikli alanlar belirlenmeli,
- Başta kamu çalışanları olmak üzere toplum genelinde yapay zekâ farkındalık ve okuryazarlık düzeyinin arttırılmasına yönelik eğitim programı, İş süreçlerinde yapay zekâ kullanımına ilişkin etik sorunların çözümüne yönelik disiplinler arası çalıştaylara dayanan çözümler üretilmeli,
- Kamu ve özel sektörde yapay zekâ kullanımına yönelik araştırma fonu, finansal destek, müşteri ilişkileri yönetimi gibi teşvikler sağlanmalı,
- Sektör, ulus ve uluslararası düzeyde işbirliği ağları ve inovasyon ekosistemi kurulmasına yönelik etkileşimi belirli bir yönergeye bağlayan düzenli sistemler geliştirilmeli,
- Yapay zekâ uygulamalarının yarattığı zararın tanzimi, sözleşme özerkliği gibi hususlar netleştirilmeli ve bunlara ilişkin destek ofisi kurulmalı,
- Yapay zekâ uygulamalarının yarattığı risk ve tehditlerle başa çıkmaya yönelik sektörel düzenlemeler yapılmalıdır.

Araştırma sonuçlarına dayalı olarak işletme yöneticilerine yönelik öneriler şu şekildedir:

- İşletmenin faaliyet alanında yürütülen başarılı yapay zekâ uygulamalarını mevcut iş süreçlerine uyumla dahil olması için gereken adımları atılmalı,
- Yapay zekâ uygulamalarının iş süreçlerine dahil etme sorumluluğunu tüm işletme paydaşlarının üstlenmesi için etkin bir iletişim süreci yürütülmeli,
- Çalışanların yapay zekâ farkındalık ve okuryazarlık düzeyinin arttırılmasına yönelik eğitimler düzenlenmeli,
- Yapay zekâ uygulamalarını işletme iş süreçlerine kademeli olarak dahil ederek değişime direnci kontrol altında tutulmalı,
- Çalışanların iş süreçlerine yapay zekâ uygulamalarına ilişkin deneyim paylaşımında bulunmasını teşvik edilmeli,
- Yapay zekâ kullanımıyla oluşan etik ve mahremiyet ihlallerinin önüne geçen veri güvenliği politikaları geliştirilmeli,
- İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının temel işleyiş ve amaçları işletme stratejik planlarıyla ilişkilendirilmeli,

- İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının yenilikçi iş modelleriyle uyumuna odaklanılmalıdır.

Araştırma sonuçlarına dayalı olarak araştırmacılara yönelik öneriler şu şekildedir:

- İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarına ilişkin politika yapıcıların kararlarına, işletme yöneticilerinin uygulamalarına temel oluşturulan nitelikle farklı sektör ve uygulama alanında; geniş bir yelpazede disiplinler arası yürütülen daha fazla yapay zekâ araştırmalar yapılmalı
- İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarını kullanan işletmelerin karşılaştığı aksaklıklar, sağladığı fayda, yakalanan fırsat ve başa çıkılan risklere ilişkin gerçekliği ortaya koyan uygulamaya yönelik işletme destekli ve deneysel çalışmalar,
- İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının etik, sosyal ve yönetsel etkilerini ele alan çalışmalar yapılmalı,
- İş süreçlerinde yapay zekâ uygulamalarının örgütsel çeviklik, liderlik ve inovasyon üzerindeki etkilerini ele alan çalışmalar yapılmalı,

İş süreçlerinde yapay zekâ uyglamalarının etkileri sektör, işletme, uygulama bazlı ele alan karşılaştırmalı çalışmalar yapılmalıdır.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdesi aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	S.D.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Araştırma sonuçlarının güvenirliğini arttırmak amacıyla destek veren Dr. Hilal ERKOL ve Öğr. Gör. Dr. Özlem ŞENLİK'e değerli katkıları ve görüşleri için teşekkür ederim.

Kaynaklar

Abbasi M, Nishat RI, Bond C, Najjaran H. 2024. A review of AI and machine learning contribution in business process management (process enhancement and process improvement approaches). Bus Process Manag J, 63: 1-39.

Adewumi A, Ewim SE, Sam-Bulya NJ, Ajani OB. 2024. Advancing business performance through data-driven process automation: A case study of digital transformation in the banking sector. Int J Mult Res Updat, 8(2): 12-22.

Akturan A. 2024. Yapay zekânın işletme yönetimi ve liderlik üzerindeki etkileri: Bir literatür incelemesi. Sinop Univ Soc Sci J, 8(2): 1305-1348.

Balaban MF, Kulular İbrahim MA. 2023. Chatgpt gibi sohbet yazılımlarının (sohbet botları/chatbots) neden olduğu hukuka aykırılıkların önlenmesi. ASBÜ Huk Fak Derg, 2: 747-789. 10.47136/asbuhfd.1355222.

Balcı A. 2015. Sosyal bilimlerde araştırma. Pegem Akademi, Ankata, Türkiye, pp: 254.

Ballı A. 2024. The effect of product personalization on consumer purchasing intention, customer satisfaction, brand loyalty and artificial intelligence applications with machine learning. Fiscaoeconomia, 8(3): 1240-1263.

Bandara W, Furtmueller E, Gorbacheva E, Miskon S, Beekhuyzen J. 2015. Achieving rigor in literature reviews: Insights from qualitative data analysis and tool-support. Commun Assoc Inf Syst, 37(1): 154-204.

Bayram V, Kaya ŞM. 2023. The contributions of metaverse technology on management information systems in strategic planning and decision-making processes of business. Ulus Yönetim Akademisi Derg, 6(3): 794-807.

Brynjolfsson E, McAfee A. 2017. The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies. W.W. Norton & Company, New York, USA, pp: 154.

Bulazar A, Küçükçolak R. 2021. Finansal teknolojilerde yenilikçi yaklaşımlar: Veri analizi ve müşteri odaklılık. Finansal Araş Çalış Derg, 13(1): 45-58.

Bulut MA, Davarcı M, Bozdoğan NK, Sarpkaya Y. 2024. Effects of artificial intelligence on education. Natl Educ J, 4(3): 976-986.

Buyukarikan B. 2022. Dijital dönüşümde bilgi işlem takip programlarının rolü ve işletme verimliliği üzerindeki etkileri. İşletme Araş Derg, 14(2): 220-235.

Chan AYW, Sung CCM. 2025. Enhancing students' digital literacy skills through their technology use in a course-based research project: A Hong Kong case study. Asia Pac Educ Rev, 2025: 1-8.

Congès A, Fertier A, Salatgé N, Rebière S, Benaben F. 2024. R-IO SUITE: Integration of LLM-based AI into a knowledge management and model-driven based platform dedicated to crisis management. Soft Syst Model, 2024: 18-41.

Cooper C, Booth A, Varley-Campbell J, Britten N, Garside R. 2018. Defining the process to literature searching in systematic reviews: a literature review of guidance and supporting studies. BMC Med Res Methodol, 18: 1-6. Doi: 10.1186/s12874-018-0545-3.

Çakılcı C, Öztürkoğlu Y. 2021. Innovative solutions in the logistics sector with the new digital age approach. J Digit Age, 4(1): 65-75. Doi: 10.46238/jobda.836758.

Çetin G. 2024. Endüstri 4.0 bağlamında yapay zekânın insan kaynakları yönetimine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya

Üniversitesi, İşletme Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, ss: 40.

Çevik KK, Kayakuş M. 2020. Bilişim teknolojileri departmanında kullanıcıların taleplerine cevap verme süresinin makine öğrenmesi ile tahmin edilmesi. J Eng Sci Design, 8(3): 728-739.

Çoban B, Karakaya YE. 2010. Geleceği planlamada stratejik yönetim ve SWOT analizi: Kavramsal yaklaşımlar. e-J New World Sci Acad, 5(4): 3C0052. ISSN: 1306-3111.

D'Amico A, Capua M, Nardo E, Rosak-Szyrocka J, Tortorella G, Festa G. 2023. Competitive advantage in healthcare based on augmentation of clinical images with artificial intelligence: case study of the 'Sambias' project. Int J Manag Financ Acc, 16(1): 1-17.

Derici S, Doğan NÖ. 2023. Forecasting order delays with artificial intelligence-based applications. İzmir Yönet Derg, 4(2): 22-27.

Doruköz KD, Uslu B. 2023. Yapay zekânın iş hayatındaki yeri: Avantajlar, dezavantajlar ve politikalar. Bandırma Onyedi Eylül Univ Soc Bilim Araş Derg, 6(CEEİK 2023 Özel Sayısı): 45-62.

Dragoni M, Eccher C, Ferro A, Bailoni T, Maimone R, Zorzi A, Bacchiega A, Stulzer G, Ghidini C. 2023. Supporting patients and clinicians during the breast cancer care path with AI: The Arianna solution. Artif Intell Med, 138: 1-25.

Edilia S, Larasati N. 2023. Innovative approaches in business development strategies through artificial ıntelligence technology. IAIC Trans Sustain Digit Innov (ITSDI), 2023: 1-8. Doi: 10.34306/itsdi.v5i1.612.

Efe A. 2021. Yapay zeka odaklı siber risk ve güvenlik yönetimi. Int J Manag Inf Syst Comput Sci, 5(2): 144-165.

Elçiçek M. 2024. A review about students' artificial intelligence literacy. Infor Techn J, 6(1): 24-35.

Esposito M, Sarbazvatan S, Tse T, Silva-Atencio G. 2024. The use of artificial intelligence for automatic analysis and reporting of software defects. Front Artif Intell, 7: 1443956.

Farinha D, Pereira R, Almeida R. 2023. A framework to support robotic process automation. J Inf Technol, 39(1): 149-166. Doi: 10.1177/0268396223116506.

Gailly F, Geerts G. 2014. Business process modeling: An accounting information systems perspective. Int J Account Inf Syst, 15: 85-92. https://doi.org/10.1016/j.accinf.2014.08.001.

Gandomi A, Haider M. 2015. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. Int J Inf Manage, 35: 137-144. Doi: 10.1016/J.IJINFOMGT.2014.10.007.

Gladilin L. 2023. Practical aspects of applying Artificial Intelligence in business. Entrepreneur's Guide, 2023: 1-6. Doi: 10.24182/2073-9885-2023-16-4-128-133.

Guldner A, Hoffmann M, Lohr C, Machhamer R, Malburg L, Morgen M, Rodermund SC, Schäfer F, Schaupeter L, Schneider J, Theusch F, Bergmann R, Dartmann G, Kuhn N, Naumann S, Timm IJ, Vette-Steinkamp M, Weyers B. 2023. A framework for AI-based self-adaptive cyber-physical process systems. Inf Technol, 65(3): 113-127.

Gülbaşı A, Karahan F. 2023. Finansal sistemde bilgi teknolojileri ve kullanımı. Int J Soc Econ Stud, 4(2): 296-319.

Gülşen İ. 2019. İşletmelerde yapay zeka uygulamaları ve faydaları: Perakende sektöründe bir derleme. J Consum Consum Res, 11(2): 407-436.

Gürel E, Tat M. 2017. SWOT Analysis: A theoretical review. J Int Soc Res, 10(51): 994-1006. Doi: 10.17719/jisr.2017.1832.

Güzel Ş, Akman Dömbekci H, Eren F. 2022. Yapay zekânın sağlık alanında kullanımı: Nitel bir araştırma. Manisa Celal Bayar Univ Sağlık Bilimleri Enstitüsü Derg, 9(4): 506-519.

Higgins JPT, Green S. 2011. Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions. Cochrane Collab.

Huynh-The T, Pham V, Pham X, Nguyen T, Han Z, Kim D. 2022. Artificial intelligence for the metaverse: A survey. Eng Appl Artif Intell, 117: 105581. Doi: 10.1016/j.engappai.2022.105581

Işık M, Çamur Ö. 2024. Yapay zekâ ve dijital okuryazarlık: Akademik çabada yeni dinamikler. Beykoz Aka Derg, 12(2): 173-197.

Jarrahi M H., 2018. Artificial intelligence and the future of work: Human-AI symbiosis in organizational decision making. Bus Horiz, 61(4): 577-586.

Jenifer, A., Khanum, A., Sarika, A., Ashwin, A. S., Latheef, A., Deepika, S., 2023. Metaverse. Int J Innov Res in Inf Secur, 2023: 1-12. doi: 10.26562/ijiris 2023.v0903.29.

Jobin A, Ienca M, Vayena E. 2019. The global landscape of AI ethics guidelines. Nat Mach Intell, 2019: 1-11. doi: 10.1038/S42256-019-00882.

Kaggwa S, Eleogu T F, Okonkwo F, Farayola O A, Uwaoma P U, Akinoso A. 2024. AI in decision making: Transforming business strategies. Int J Res Sci Innov, : 423-444.

Kampik T, Warmuth C, Rebmann A, Agam R, Egger L N P., Gerber A, Hoffart J, Kolk J, Herzig P, Decker G, van der Aa, H, Polyvyanyy A, Rinderle-Ma S, Weber I, Weidlic, M. 2024. Large process models: A vision for business process management in the age of generative AI. arXiv, 2309.00900. doi: 10.1007/s13218-024-00863-8.

Karakulle İ, Aktepe Ş, 2023. İşletmelerde rekabet üstünlüğü sağlamada yapay zekâ kullanımı: E-ticaret sitelerinin mobil uygulamaları örneği. Fenerbahçe Univ Sos Bilim Derg, 3(1): 30-46. doi: 10.58620/fbujoss.1287967.

Kaushik P, 2022. Role and application of artificial intelligence in business analytics: A critical evaluation. Int J Glob Acad Sci Res, 1(3): 1-7.

Kitchenham B, 2007. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. EBSE Technical Report. Software Engineering Group, School of Computer Science and Mathematics, Keele University, Keele, UK, pp: 46.

Koçel T, 2018. Business management. Beta Printing Publication, Ankara, Türkiye, pp: 25.

Kovshova T, Trifonov P, Ramirez-Asis E, 2023. Improving the efficiency of intellectualisation processes in enterprise management systems. Systems, 11: 266. doi: 10.3390/systems11060266.

Kurt FB, Akçacı T, 2024. Endüstri 4.0 uygulamalarının tedarik zinciri performansına etkisi. Trends Bus Econ, 38(1): 12-23.

Lee I, 2017. Big data: Dimensions, evolution, impacts, and challenges. Business Horizons, 60(3): 293-303.

Lee J, Seshia SA, 2016. Cyber-physical systems: a new frontier. In Cyber-Physical Systems, Springer, London, UK, pp: 1-16.

Li S, Xu L, Zhao S, 2014. The internet of things: A survey. Inf Sys Front, 17: 243-259.

Lu Y, Papagiannidis S, Alamanos E, 2018. Internet of things: A systematic review of the business literature from the user and organizational perspectives. Technol Forecast Soc Change, 136: 285-297. doi: 10.1016/J.TECHFORE.2018.01.022.

Madakam S, Ramaswamy R, Tripathi S, 2015. Internet of things (IoT): A literature review. J Comput Chem, 3: 164-173.

Mendling J, Decker G, Hull R, Reijers HA, Weber I, 2018. How do machine learning, robotic process automation, and blockchains affect the human factor in business process management? Commun Assoc Inf Syst, 43: 1-23.

Mert M, 2024. Dijital liderlik ve örgütsel çeviklik ilişkisi üzerine bir araştırma. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Denizli, Türkiye, ss: 56.

Milani F, 2019. Business processes. Digital business analysis. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-05719-0_9. (accesed date: September 14, 2024).

Miles MB, Huberman AM, 1994. Qualitative data analysis. Sage Publication, London, UK, pp: 257.

Mittelstadt B, 2019. Principles alone cannot guarantee ethical AI. Nat Mach Intell, 1: 1-7. doi: 10.1038/s42256-019-0114-4.

Motorcu AR, Murat B. 2021. Yeni iş yeri riskleri ve yapay zekânın iş sağlığı ve güvenliğinde kullanımı. Plus Grup A.Ş. Yayınları, İstanbul, Türkiye, ss: 369-402.

Muller AE, Berg RC, Meneses-Echavez JF, Ames HMR, Borge TC, Jardim PSJ, Cooper C, Rose CJ. 2023. The effect of machine learning tools for evidence synthesis on resource use and time-to-completion: protocol for a retrospective pilot study. Syst Rev, 12: 7. doi: 10.1186/s13643-023-02171-y.

Nesterak J, Szelągowski M, Radziszewski P. 2024. Workplace performance measurement: Digitalization of work observation and analysis. J Intell Manuf, 2024: 1-17. doi: 10.1007/s10845-024-02419-x.

Okay S. 2023. Dijital pazarlamada yapay zekâ ve makine öğrenimi kullanımı. Elektronik Sos Bilimler Derg, 22(85): 135-142.

Özan M. 2021. Süreç yönetimi ve süreç iyileştirmenin işletme performansına etkilerinin analizi. Isletme Arastirmalari Dergisi, 13(2): 1144-1161.

Özçetin N. 2024. Endüstri 4.0 ve endüstri 5.0 perspektiflerinde muhasebe: Teorik bir inceleme. Yönetim Bilimleri Derg, 22(Özel Sayı): 1324-1344.

Öztemel E. 2000. Artificial intelligence and the future of humanity. In: Şeker M, Bulduklu Y, Korkut C, Doğrul M (eds.) Information technologies and communication: individual and social security. Anı Publishing, Ankara, Türkiye, pp: 95-112.

Park S, Kim Y. 2022. A Metaverse: Taxonomy, Components, Applications, and Open Challenges. IEEE Access, 10: 4209-4251.

Parvin GB, Ghasemi, Parvin L. 2023. Applications of artificial intelligence in fault detection and prediction in technical systems. Proceedings of the 14th Int Conf Recent Dev Manage Ind Eng (ICRD-MIE), July 13, Chisinau, Moldova, pp: 68.

Petticrew M, Roberts H. 2006. systematic reviews in the social sciences: a practical guide. Blackwell Publishing, Oxford, UK, pp: 35.

Plattfaut R, Borghoff V. 2022. Robotic Process Automation: A Literature-Based Research Agenda. J Inf Syst, 36: 173-191. doi: 10.2308/isys-2020-033.

Rajkumar R, Lee I, Sha L, Stankovic JA. 2010. Cyber-physical systems: The next computing revolution. In: Proc 47th IEEE Conf Decision Control, IEEE, 9-11 December, Cancun, Mexico, pp: 5577-5584.

Sabancı Bayramoğlu M. 2023. İşletmelerde dijital izleme sistemlerinin kullanımının rekabet avantajına etkisi. Yönetim ve Organizasyon Araştırmaları Dergisi, 5(1): 10-25.

Salih P. 2024. Dijital teknolojilerin iş organizasyonlarındaki dönüşüm etkisi: Sosyal politika öğrencileri perspektifinden nitel bir araştırma. Int J Soc Sciences Educ Res, 2024: 69-76.

Sari T. 2024. Finansal yazılımlar ve işletme süreçlerinde dönüşüm: Risk yönetimi ve hız optimizasyonu. İşletme ve Finans Dergisi, 39(1): 75-92.

Seçkin Kapucu M, Yıldırım İ. 2019. Türkiye'de sanal ve artırılmış gerçeklik üzerine eğitimde yapılan çalışmalara ilişkin metodolojik bir inceleme. Akademik Bakış Dergisi, (73): 26-42.

Seun B, Adeyemo T, Ojo A. 2023. Information system monitoring and security challenges in modern enterprises. J Busin Inform Syst, 18(2): 99-114.

Shahzad K, Ghulam AM, Aslam F. 2020. Effective utilization of supervised learning techniques for process model matching. Comput Inform, 39: 361-384. doi:10.31577/cai2020.3.361.

Sohail A, Dominic DD, Hijji M, Butt MA. 2021. Competency driven resource evaluation method for business process intelligence. Comput Mater Continua, 69(1): 1141-1157.

Sohail A, Shahzad K, Dominic PDD, Butt MA, Arif M, Tariq MI. 2020. On computing the suitability of non-human resources for business process analysis. Comput Mater Continua, 67(1): 303-319.

Suhaili S, Salim N, Jambli M. 2021. Service chatbots: A systematic review. Expert Syst Appl, 184: 115461. doi:10.1016/J.ESWA.2021.115461.

Szelagowski M, Sliz P. 2024. Toward BPM maturity assessment integrated with BPM implementation and use. Bus Process Manag J, 2024: 1463-7154. doi:10.1108/BPMJ-04-2024-0249.

Şahinaslan E. 2023. İş süreci optimizasyonu: Yöntem, teknoloji, riskler ve fırsatlar. J Acad Proj, 8(2): 570-604.

Şengün Öztaş E. 2024. Eğitimde arttırılmış gerçeklik teknolojisi kullanımı: 2014-2024 sistematik alanyazın taraması. Ufuk Üniv Sos Bil Ens Derg, 13(26): 33-54.

Tafla TL, Brunoni D, Carreiro LRR, Seabra AG, Silva LA, Bastos DC, Rossi AC, Santos PHA, Teixeira MCTV. 2021. DIagnosys: An analytical framework for the identification of elementary school students with intellectual disability. Front Educ, 6: 609523. doi:10.3389/feduc.2021.609523.

Tekin A, Demirel O. 2024. The relationship between artificial intelligence technologies and employment and productivity. Reflect Indust Digilizat Soc Sci 22(Special Issue): 1585-1618.

Thomas J, Harden A. 2008. Methods for the thematic synthesis of qualitative research in systematic reviews. BMC Med Res Methodol, 8(1): 45.

Tian X, Pavur RJ, Han H, Zhang L. 2023. A machine learning-based human resources recruitment system for business process management: Using LSA, BERT and SVM. Bus Process Manag J, 29(1): 202-222. https://doi.org/10.1108/BPMJ-08-2022-0389

Ünal A, Kılınç İ. 2020. Yapay zekâ işletme yönetimi ilişkisi üzerine bir değerlendirme. Yönetim Bil Sist Derg, 6(1): 51-78. doi:10.341407595

Ünsal H. 2024. Artificial intelligence and its possible implications for the future of education. J Soc Humanit Admin Sci, 10(5): 674-682.

Yeşilkaya N. 2022. Ethical issues regarding artificial intelligence. J Sarkiyat Sci Res, 14(3): 949-963.

Yıldız İ, Taşhan A. 2023. Yapay zekâ: Bir tehdit mi? Bir yardımcı mı? Tekstil sektöründe nitel bir araştırma. Iğdır Üniv İktisadi ve İdari Bil Fak Derg, 9: 1-14.

Yıldız MS, Yıldırım Y, Kesici B. 2021. Düzce bölgesindeki firmaların endüstri 4.0 yaklaşımı. Elektr Sos Bilimler Derg, 20(80): 1773-1797.

Yüksel H. 2017. Sanal gerçeklik uygulamalarının tüketici davranışı üzerindeki etkisi: Pazarlama perspektifinden bir değerlendirme. Pazarlama ve Tüketici Araştırmaları Dergisi, 9(1): 32-50.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1583759

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)
Cilt 8 - Sayı 3: 695-703 / Mayıs 2025
(Volume 8 - Issue 3: 695-703 /May 2025)

ŞİZOFREN HASTALARININ TESPİTİNDE YAPAY ZEKA TABANLI PERFORMANS ANALİZİ

Ali NARİN[1]*, Burhan SEZEN[1]

[1]*Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 67100, Zonguldak, Türkiye*

Özet: Şizofreni (SZ), algıda ve davranışlarda olumsuzlukların yaşandığı, seslerin ya da yaşananların gerçek veya hayal ayrımının yapılamadığı zihinsel bir hastalıktır. Halüsinasyonlar, hezeyanlar, konuşma ve duyguyu ifade etmede zorluk yaşama şizofreni belirtileri arasında yer almaktadır. Bu gibi kalıcı problemlerin önüne geçilmesi için SZ'nin erken tespiti hayati öneme sahiptir. Tanı amaçlı çoğunlukla ön muayene ile birlikte kan tahlili, beyin görüntüleme ve elektroensefalogram (EEG) sinyalleri kullanılmaktadır. EEG oldukça düşük genliğe sahip olmasının yanı sıra çok farklı frekanslar barındırması nedeniyle SZ'nin tespit performansı değişebilmektedir. Bu çalışmada EEG sinyalleri kullanılarak SZ hastalarının tespiti gerçekleştirilecektir. 39 sağlıklı, 45 SZ hastasına ait EEG verileri üzerinden çalışma sonuçları elde edilmiştir. Farklı normalize edilmiş EEG işaretleri üzerinden zaman ve frekans alanı ölçümleri ile birlikte geriye doğru eleme yöntemi de uygulanarak tespit edilen özniteliklerin başarımları kayıt altına alınmıştır. Çalışmada k-en yakın komşu (k-NN) algoritması kullanılmıştır. Sonuç olarak z-skor normalizasyonlu ve 13 öznitelikle k-NN (k=1) için %83,6 doğruluk değeri elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar SZ hastalarının oldukça yüksek başarım ile tespit edilebileceğini göstermektedir. Çalışmanın nöroloji uzmanlarına da karar destek sistemi olarak fayda vereceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Şizofreni, EEG, Öznitelik çıkarımı, Geriye doğru eleme, k-NN

Artificial Intelligence Based Performance Analysis in Detection of Schizophrenia

Abstract: Schizophrenia (SZ) is a mental illness in which there are negative perceptions and behaviors, and it is not possible to distinguish between real and imaginary sounds or experiences. Hallucinations, delusions, difficulty in speaking and expressing emotions are among the symptoms of schizophrenia. Early detection of SZ is of vital importance in order to prevent such permanent problems. Blood tests, brain imaging and EEG signals are mostly used together with preliminary examination for diagnosis. Since EEG has a very low amplitude and contains very different frequencies, SZ detection performance may vary. In this study, SZ patients will be detected using EEG signals. The study results were obtained from EEG data of 39 healthy and 45 SZ patients. The performance of the detected features was recorded by applying backward elimination method together with time and frequency domain measurements on different normalized EEG signals. The k-nearest neighbor (k-NN) algorithm was used in the study. As a result, 83.6% accuracy value was obtained for k-NN (k=1) with z-score normalization and 13 features. These results show that SZ patients can be detected with very high accuracy. It is also thought to be useful as a decision support system for neurology specialists.

Keywords: Schizophrenia, EEG, Feature extraction, Backward elimination, k-NN

***Corresponding author:** Zonguldak Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 67100, Zonguldak, Turkey.
E mail: alinarin@beun.edu.tr (A. NARİN)
Ali NARİN https://orcid.org/0000-0003-0356-2888
Burhan SEZEN https://orcid.org/0000-0002-7286-740X

Gönderi: 12 Kasım 2024 **Received:** November 12, 2024
Kabul: 21 Mart 2025 **Accepted:** March 21, 2025
Yayınlanma: 15 Mayıs 2025 **Published:** May 15, 2025

Cite as: Narin A, Sezen B. 2025. Artificial intelligence based performance analysis in detection of schizophrenia patients. BSJ Eng Sci, 8(3): 695-703.

1. Giriş

Son yıllarda, psikiyatrik bozukluklar oldukça yaygın hale gelmiştir ve bu rahatsızlıkların gelişimini etkileyen faktörler önemli bir araştırma konusu olmuştur. Yapılan araştırmalar, genetik, biyolojik, olumsuz yaşantıların ve travmaların ruhsal bozuklukların gelişim sürecinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır (Akcan ve Taşören, 2020, Aktay ve Hızlı Sayar, 2021). Özellikle, çocukluk çağındaki maruz kalınan fiziksel, cinsel ve duygusal ihmal ile istismar türlerinin, bireyin ileriki yaşamında psikiyatrik rahatsızlıkların gelişimine zemin hazırladığı vurgulanmaktadır (Karal ve Atak, 2022). Psikiyatrik bozukluklar, bireylerin günlük yaşam aktivitelerini, mesleki performanslarını ve sosyal ilişkilerini önemli ölçüde olumsuz etkilemektedir. Bu bozukluklara sahip kişiler, günlük işlevselliklerini yerine getirmede, temel ihtiyaçlarını karşılamada ve sosyal etkileşimlerini sürdürmede zorluklarla karşılaşabilmektedir. Bunun yanı sıra, toplumsal düzeyde psikiyatrik hastalıklara yönelik olumsuz ve damgalayıcı tutumların varlığı, bu bireylerin topluma yeniden entegrasyonunu ve sosyal destek sistemlerine erişimini güçleştirmektedir (Boz vd., 2020). Yaygın olarak görülen psikiyatrik hastalıklar arasında anksiyete bozuklukları, dikkat eksikliği ve hiperaktivite bozukluğu, uyku bozuklukları, yeme bozuklukları, obsesif-kompulsif bozukluk, şizofreni (SZ), sosyal anksiyete bozukluğu ve alkol ile madde kullanımına bağlı gelişen bozukluklar

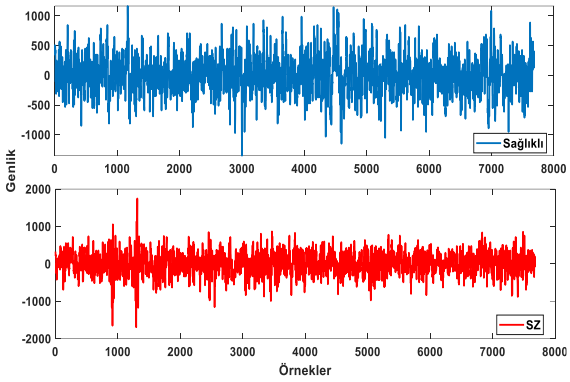
This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

bulunmaktadır. Bu rahatsızlıkların içerisinde SZ, halüsinasyonlar, düzensiz konuşma, düşünmede zorluk ve motivasyon eksikliği gibi belirtiler gösteren zihinsel bir hastalıktır (Rizvi vd., 2024). SZ hastalığının dünya nüfusunun yaklaşık %1'ini etkilediği bilinmektedir (Birnbaum, 2023). SZ dünya çapında önde gelen 25 engellilik nedeninden biri olarak görülmektedir (Jin ve Mosweu, 2017). Burada en önemli konu SZ hastalarının doğru ve kesin bir şekilde tespit edilebilmesidir. Genel anlamda SZ hastalarıyla birlikte diğer psikolojik hastalıklarda da hezeyan, halüsinasyon gibi zihinsel bozukluklar olabileceğinden kesin tanı konulamamaktadır (Larson vd., 2010). SZ tespitinde hastanın klinik geçmişi, kan tahlili, beyin görüntüleme ve elektroensefolagram (EEG) sinyallerinden yararlanılır. Bunlar arasında daha düşük maliyetli EEG sinyallerini kullanarak literatürde sınırlı sayıda SZ hastalarının otomatik tespiti üzerine yapılmış çalışma bulunmaktadır. Literatüre bakıldığında, Kim vd. (2015) çalışmalarında SZ hastalarından ve aynı sayıda sağlıklı kontrol grubundan elde edilen EEG sinyallerinde delta, teta, alfa, beta ve gama gibi beş frekans bandını analiz etmişler, bu frekans bantlarının spektral değerlerini Hızlı Fourier Dönüşümü ile hesaplamışlardır. Delta alt frekans bandında %62,2 doğruluk elde etmişlerdir. Piryatinska vd. (2017) SZ tespiti için rastgele orman sınıflandırıcısını kullanan klasik bir özellik mühendisliği modeli uygulamış ve %83,6 oranında doğruluk değeri elde etmiştir. Dvey-Aharon vd. (2015) Stockwell tabanlı zaman-frekans temsili ve özellik optimizasyon yöntemi ile SZ hastalarına ait EEG sinyallerini başarıyla analiz etmiş ve %88,7 doğruluk elde etmiştir. Bu yöntem ile, EEG sinyallerindeki zaman-frekans değişimleri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Santos-Mayo vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada ise 157 özellik çıkarılmış ve özellik seçimi için istatistiksel bir yaklaşım olan student's t-test uygulanmıştır. Çeşitli sınıflandırıcıların denendiği bu çalışmada, destek vektör makinesi (SVM) ile en iyi sınıflandırma performansını %93,4 doğruluk değeri ile elde etmişlerdir. Das ve Pachori (2021) iç mod fonksiyonları ve Hjorth parametrelerini kullanarak SVM sınıflandırıcı algoritması ile %98,9 doğruluk elde etmiştir. Bir başka çalışmada Türk vd. (2024) EEG sinyallerinin dalgacık alt bantlarını iki boyutlu görüntüye dönüştürerek SZ teşhisini gerçekleştirmek için ResNet tabanlı bir model sunmaktadır. %92,9 doğruluk değeri elde eden sistem, hastalığa özgü özellikleri görselleştirmeyi sağlamaktadır. Bu çalışmalar ışığında, EEG sinyallerini temel alan algoritmalarla SZ tanısında önemli gelişmeler elde edildiği gösterilmektedir. Bunlara ek olarak EEG işaretleri üzerindeki normalizasyon işlemlerinin sınıflandırma başarımlarını ele alan çalışmalar da vardır (Hosseini & Naghibi-Sistani, 2011; Bashivan et al., 2016). Fakat, SZ hastalarının tespitine yönelik farklı normalizasyon tekniklerinin sınıflandırma başarımlarının analizi detaylı olarak incelenmemiştir. Ayrıca, EEG işaretlerinin farklı hastalıkları sınıflandırma çalışmalarında, k-NN algoritmasında k değerinin model performansı üzerindeki etkisi bazı çalışmalarda sunulmuştur (Subasi, 2007; Lotte et al., 2018). Burada da, SZ teşhisi özelinde detaylı bir çalışma bulunmadığı görülmektedir. Bu sebeple k değerinin optimizasyonu ve uzaklık ölçütleri ile kombinasyonu üzerine daha çok incelemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, Moskova Devlet Üniversitesi tarafından halka açık şekilde sunulan EEG veri seti kullanılmıştır. Veri seti içinde 39 sağlıklı ve 45 SZ'li olmak üzere etiketlenmiş toplam 84 adet EEG kaydı bulunmaktadır. Normalize edilmemiş ham EEG işareti, z-normalizasyonlu ve min-max normalizasyonlu EEG işaretleri üzerinden zaman ve frekans alanı ölçümleri kullanılarak öznitelik çıkarılmıştır. Elde edilen özniteliklere geriye doğru eleme yöntemi uygulanmış ve bu şekilde yüksek performans gösteren öznitelikler seçilerek belirlenmiştir. Bu öznitelikler ile k- en yakın komşu (k-NN) algoritması için k değerinin 1-20 arasındaki değerleri için performans sonuçlarına bakılmıştır. Bu çalışmanın özgün değerini özetleyecek olursak maddeler halinde şu şekilde ifade edebiliriz: (i) Normalizasyon işlemlerinin performansa etkileri analiz edildi, (ii) Literatürde sıklıkla tercih edilen temel algoritmalardan olan k-NN algoritmasının k değerinin performansa olan etkileri ve uzaklık ölçütünün performansları incelendi, (iii) Temel öznitelikler olan zaman ve frekans alanı ölçümlerinin Şizofren hastalarını tespitindeki başarımları analiz edildi, (iv) Son olarak geriye doğru eleme yöntemi ile elde edilen özniteliklerin performans analizleri yapılmıştır. Çalışmanın devamında, kullanılan veri seti, gerçekleştirilen ön işlem adımlarından z-skor normalizasyon, min-max normalizasyon, zaman ve frekans alanı ölçümleri, k-NN algoritması, performans ölçütleri, bulgular ve tartışma ve sonuç başlıklarına yer verilecektir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Veri Seti

Çalışmada http://brain.bio.msu.ru/eeg_schizophrenia.htm web sitesinden ulaşılan Moskova Devlet Üniversitesi tarafından erişime açılmış EEG veri seti kullanılmıştır (Borisov and Kaplan, 2005). Veri seti içinde 39 adet sağlıklı ve 45 adet SZ hastasına ait veri bulunmaktadır. Tüm EEG kayıtları, tüm deneklerin gözleri kapalı bir şekilde rahat ve uyanık durumda olduğu sırada elde edilmiştir. Tüm EEG işaretleri 10-20 elektrot sistemine göre yerleştirilen 16 kanaldan oluşmaktadır (O1, O2, P3, P4, Pz, T5, T6, C3, C4, Cz, T3, T4, F3, F4, F7). Her bir EEG sinyali 128 Hz hızında örneklenmiştir. Şekil 1'de sağlıklı ve SZ hastalarına ait EEG kayıtları gösterilmektedir. Çalışmada tüm EEG kanalları kullanılmıştır.



Şekil 1. Sağlıklı ve SZ EEG kayıt örnekleri.

2.2. Normalizasyon

Farklı ölçeklerde bulunan verilerin ortak bir ölçeğe indirgenmesi sürecine normalizasyon adı verilmektedir. Veri dağılımının homojen hale getirmeyi amaçlayan bu işlem verilerin analiz süreçlerine önemli katkılar sunmaktadır. Normalizasyon işleminin veriler arasındaki düzensizliği ve karmaşıklığı minimize ederek model performansını iyileştirdiği bilinmektedir (Singh ve Singh, 2020). Bu çalışmada iki farklı normalizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bunlar min-max normalizasyon ve z-skor normalizasyon yöntemleridir.

2.2.1. Min-max normalizasyon

Min-max normalizasyon yöntemi, bir özniteliğe ait verilerin en küçük ve en büyük değerlerinin kullanılmasıyla, ilgili öznitelikteki tüm verilerin belirli bir aralığa, genellikle [0, 1] veya [-1, 1] aralığına, ölçeklenmesini sağlayan bir tekniktir. Bu yöntem, her bir öznitelik için ayrı ayrı uygulanır ve verilerin farklı aralıklarda olmasından kaynaklanan aşırı sayısal farkların ortadan kaldırılmasını hedefler. Böylelikle, tüm öznitelikler belirli bir standart aralıkta normalize edilerek, modelleme ve analiz süreçlerinin performansı iyileştirilir ve daha tutarlı sonuçlar elde edilmesi sağlanır. Min-max normalizasyonu, makine öğrenmesi ve veri madenciliği gibi alanlarda veri ön işleme aşamasında sıklıkla kullanılan etkili bir yöntemdir (Narin, 2020). Min-max normalizasyon yönteminin matematiksel gösterimi (eşitlik 1),

$$X_{min-\max(i)} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

şeklindedir. Burada, $X_{min-\max(i)}$, normalize edilmiş i. veriyi, Xi , normalize edilecek i. veriyi, X_{min}, aynı öznitelikteki en küçük değeri, X_{max}, aynı öznitelikteki en büyük değeri ifade etmektedir.

2.2.2. Z-Skor normalizasyon

Z-skor normalizasyon işleminde veriler ortalamadan uzaklıklarına göre standart hale getirilir. Yani, veri noktaları ortalamadan ne kadar uzakta ise o nispette bir z-skoru alır. Bu normalizasyon işlemi verilerin birim varyansa sahip olduğu ve ortalamalarının sıfır olduğu bir ölçeklendirmeye olanak sağlar. Matematiksel formülü şu şekildedir (eşitlik 2) (Sürücü vd., 2023):

$$Z - skor(i) = \frac{X_i - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

Burada, $Z - skor(i)$, z-skor normalizasyonu yapılarak elde edilen yeni değeri, X_i normalizasyon yapılacak i. veri noktasını, μ ortalamayı ve σ standart sapmayı temsil eder. Bu yöntem özellikle makine öğrenimi ve istatistiksel analizlerde çok yaygın olarak kullanılır.

2.3. Öznitelik Çıkarımı

Öznitelik çıkarımı, ham veya işlenmiş verilerin altında yatan özellikleri elde etme sürecidir. Bir diğer ifade ile bir veri kümesindeki sınıflara veya ayrımlara katkıda bulunan temel özellikleri belirleme sürecidir. Bu aşamada ham veri boyutları azalırken makine öğrenmesi algoritmalarının da model performansları artmaktadır. Bu çalışmada, Tablo 1'de yer alan özniteliklerden yararlanılmıştır.

Tablo 1. Elde edilen öznitelikler ve sayıları

Öznitelik	Ölçümler	Adet
Zaman Analizi	Ortalama, Varyans, Standart Sapma, En Büyük Değer, En Küçük Değer, Basıklık (Kurtosis), Çarpıklık (Skewness) ve Hurst Üssü	8
Frekans Analizi	Delta, Teta, Alfa, Beta ve Gama bantları ile Teta/Alfa, Beta/Alfa, Teta + Alfa/Beta, Teta/Beta, Teta + Alfa/Beta + Alfa, Gama/Delta, Gama + Beta/Delta + Alfa	12
Toplam		20

2.3.1. Zaman analizi ölçümleri

Zaman analizi ölçümleri kapsamında toplamda 8 adet öznitelik çıkarılmıştır. Çıkarılan bu öznitelikler EEG verisinin zaman boyutundaki ölçümleridir. Bunlar, ortalama, varyans, standart sapma, en büyük değer, en küçük değer, çarpıklık, basıklık, hurst üssü ölçümleridir. Sırasıyla matematiksel formülleri şu şekildedir (eşitlikler 3, 4, 5, 6,7 ve 8):

$$\text{Ortalama (Mean, } \mu) = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} x(t) \quad (3)$$

Burada N değeri veri nokta sayısını, $x(t)$ ortalaması alınacak sinyalin zaman boyutundaki gösterimini ifade eder.

$$\text{Varyans (Variance, } \sigma 2) = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(x(t) - \mu)^2 \quad (4)$$

Standart Sapma (Standard Deviation) (eşitlik 5)

$$\sigma) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(x(t) - \mu)^2} \quad (5)$$

En Büyük Değer (Maximum, x max)= $\max(x(t))$
En Küçük Değer (Minimum, x min)= $\min(x(t))$

$$\text{Çarpıklık (Skewness, } \Upsilon 1) = \frac{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(x(t) - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (6)$$

$$\text{Basıklık (Kurtosis, } \Upsilon 3) = \frac{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(x(t) - \mu)^4}{\sigma^4} - 3 \quad (7)$$

$$\text{Hurst Üssü (Hurst Exponent, H)} = \lim_{N\to\infty} \frac{log(R/\sigma)}{log(N)} \quad (8)$$

Burada, R, zaman serisinin kümülatif aralığını ifade eder.

2.3.2. Frekans analizi ölçümleri

Frekans analizi, zaman serisi verilerinin spektral bileşenlerini inceleyerek sinyalin zamana bağlı değişimlerini analiz etmeye olanak sağlayan önemli bir yöntemdir. EEG sinyallerinin frekans analizi, beyin aktivitesini karakterize etmek ve nörolojik durumları anlamlandırmak açısından büyük bir öneme sahiptir. EEG sinyalleri genellikle delta (0.5-4 Hz), teta (4-8 Hz), alfa (8-12 Hz), beta (12-30 Hz) ve gama (30 Hz ve üstü) olmak üzere beş ana frekans bandından oluşmaktadır. Bu çalışmada, EEG verilerinin barındırdığı frekans bileşenlerinin elde edilmesi için Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) kullanılmıştır. SSD, zaman-frekans analizi yaparak sinyalin zamana bağlı değişen frekans bileşenlerini belirlemekte güçlü bir yöntemdir. Bu dönüşüm sayesinde EEG sinyallerinin spektral dağılımı çıkarılmış ve her bir frekans bandının spektral güç yoğunluğu hesaplanmıştır.

Elde edilen 12 adet frekans alanı ölçümü aşağıdaki gibidir:

- Delta (0.5-4 Hz) güç değeri
- Teta (4-8 Hz) güç değeri
- Alfa (8-12 Hz) güç değeri
- Beta (12-30 Hz) güç değeri
- Gama (30 Hz ve üstü) güç değeri
- Teta/Alfa oranı - Zihinsel yorgunluk ve dikkat süreçleri ile ilişkilendirilmiştir.
- Beta/Alfa oranı - Bilişsel aktivite ve dikkat düzeyiyle bağlantılıdır.
- (Teta+Alfa)/Beta oranı - Bilişsel süreçlerde dikkat ve gevşeme dengesini temsil eden bir parametredir.
- Teta/Beta oranı - Dikkat eksikliği ve hiperaktivite bozukluğu (DEHB) araştırmalarında önemli bir ölçümdür.
- (Teta+Alfa)/(Alfa+Beta) oranı - Bilişsel yük ve gevşeme durumlarını analiz etmek için kullanılan bir parametredir.
- Gama/Delta oranı - Beyin fonksiyonlarının entegrasyonu ve bilinç düzeyi ile ilişkilendirilen bir ölçümdür.
- (Gama+Beta)/(Delta+Alfa) oranı - Nörobilişsel süreçlerin değerlendirilmesinde kullanılan bir bileşik parametredir.

Bu parametrik özellikler, beyin aktivitesinin bilişsel ve nörolojik durumlarını daha iyi anlamak amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Eoh vd., 2005; Jap vd., 2009; da Silveira vd., 2016).

2.4. K-En Yakın Komşu

k-En Yakın Komşu (k-NN) algoritması, en basit ve en çok kullanılan sınıflandırma algoritmalarından biridir. Parametrik olmayan denetimli öğrenme kapsamında yer alan k-NN algoritması, sınıflandırma ve regresyon problemlerinde sıklıkla kullanılır (Şenyer Yapıcı ve Uzun Arslan, 2024). Bu algoritmada ayrıca bir eğitim süreci yoktur. Test aşamasında yeni bir veri noktasının sınıfını ya da değerini belirlerken, veri kümesindeki en yakın k adet komşusuna bakar. Komşu kavramı, verilerin birbiri arasındaki uzaklık ve benzerlik olarak tanımlanır. Sınıflandırma problemlerinde sınıfı bilinmeyen bir veri girdi olarak verildiğinde mevcut veri noktaları ile arasındaki uzaklıklar hesaplanır. En küçük mesafeye sahip k adet komşu seçilir. Seçilen k adet komşunun çoğunlukta olduğu sınıf değerine göre, yeni veri noktasının sınıfı olarak atanır. Bu sayede yeni verinin en yakın komşularına göre karar verilir. Regresyon problemleri için kullanılıyorsa, seçilen k adet komşunun ortalama değerine göre yeni veri üretilir. k-NN algoritmasında en önemli parametre test sürecinde kullanılan k değeridir. Probleme özgü k değerlerinin belirlenmesi önemlidir. Her probleme göre farklı k değerlerinde algoritma farklı performans gösterir. Örneğin, k değerinin çok küçük seçilmesi, modelin aşırı uyum yapmasına yani her veriye çok fazla duyarlı hale gelmesine neden olabilir. Yüksek k değeri ise modelin genellemeyi artırarak daha dengeli tahminlerde bulunmasını sağlayabilir. Bazen yüksek k değerleri karar sınırlarının bulanıklaşmasına yol açarak başarımları düşürebilmektedir. Performansı etkileyen bir diğer parametre uzaklık ölçütüdür. "Euclidean", "Cosine", "Hamming", "Minkowski", "Chebyshev" ve "Cityblock" gibi bir çok uzaklık ölçütü bulunmaktadır. Bu çalışmada dört farklı uzaklık ölçütüne göre çalışma sonuçları elde edildi. Bunlar (eşitlikler 9, 10, 11 ve 12):

$$d_{\text{Euclidean}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \quad (9)$$

$$d_{\text{Minkowski}} = \sum_{i=1}^{n}(|x_i - y_i|^p)^{\frac{1}{p}} \quad (10)$$

$$d_{\text{Chebyshev}} = max_{i=1}^{n}|x_i - y_i| \quad (11)$$

$$d_{\text{Cityblock}} = \sum_{i=1}^{n}|x_i - y_i| \quad (12)$$

şeklindedir.

2.5. Geriye Doğru Eleme ile Öznitelik Seçimi

Geriye doğru eleme yöntemi küçük veri setleri ve öznitelikleri bir özellikleri az olan veri setleri için model performansını arttırmak için kullanılan öznitelik seçme yöntemidir. Bu yöntem gereksiz ya da önemsiz özniteliklerin veri setinden elenmesini hedefler. Yöntem olarak tüm öznitelikler ile başlanılan başarım performanslarının kademeli olarak çıkarılan her bir özniteliğin performansı düşürüp düşürmediğine bakılır. Eğer başarım düşüyorsa o öznitelik veri seti için önemlidir. Çıkarıldığında başarım yükseliyorsa o öznitelik veri setinde istenmez ve elenir. Bu sayede yalnızca modelin performansını artırmaya katkıda bulunan önemli özniteliklerin veri setinde kalması sağlanır (Farahdiba vd., 2023).

2.6. Performans Ölçütleri

Performans ölçütleri, sınıflandırma algoritma ve parametrelerinin ne kadar doğru olduğunu gösteren göstergelerdir. En çok kullanılan performans metrikleri Doğruluk (Accuracy, ACC), Duyarlılık (Recall, REC), Kesinlik (Precision, PRE) ve F1-Skor (F1) dur (Kamble vd., 2022). Tüm bu metrikler hata matrisi üzerinde bulunan TP, TN, FP, FN değerleri ile hesaplanır. Bir sınıflandırma probleminde, gerçekten hasta olup sınıflandırıcı tarafından doğru bir şekilde hasta olarak tanımlanan

örneklerin sayısı 'TP' (True Positive) olarak adlandırılır. Gerçekte hasta olan ancak sınıflandırıcı tarafından yanlış bir şekilde sağlam olarak belirlenen örneklerin sayısı ise 'FN' (False Negative) olarak ifade edilir. Benzer şekilde, gerçekten sağlam olup sınıflandırıcı tarafından doğru bir şekilde sağlam olarak tanımlanan örneklerin sayısı 'TN' (True Negative) ve aslında sağlam olan bireylerin yanlışlıkla hasta olarak sınıflandırıldığı durumlar ise 'FP' (False Positive) olarak tanımlanır. ACC değeri, tüm örnekler içindeki doğru sınıflandırma oranını temsil eder (eşitlikler 13, 14, 15 ve 16) (Erdoğan ve Narin, 2021).

$$ACC = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (13)$$

REC değeri, modelin gerçek pozitifleri ne kadar doğru tahmin ettiğini temsil eder. Özellikle "pozitif" sınıfa ait örneklerin önemli olduğu durumlarda sıklıkla tercih edilir.

$$REC = \frac{TP}{TP+FN} \quad (14)$$

PRE değeri, modelin pozitif olarak sınıflandırdığı örneklerin ne kadarının gerçekten pozitif olduğunu temsil eder.

$$PRE = \frac{TP}{TP+FP} \quad (15)$$

F1 değeri ise REC ve PRE değerlerinden elde edilen bir değerdir. Harmonik ortalama kullanılarak hesaplanır.

$$F1 = 2x\frac{PRExREC}{PRE+REC} \quad (16)$$

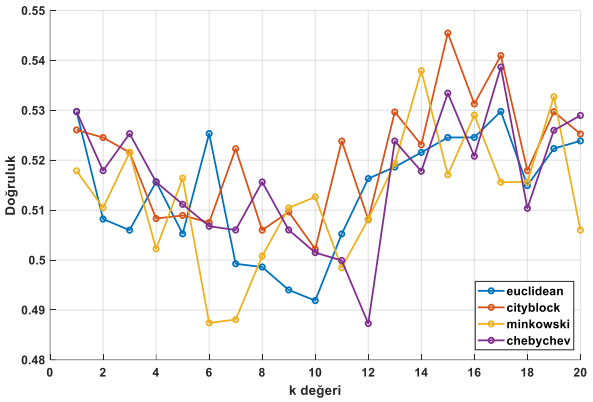
Çalışma sonuçlarını elde ederken verilerin test ve eğitim olarak ayrılmasında 10-fold çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. Burada verilerden bir tanesi test diğer kalan dokuz tanesi eğitim için kullanılır. Her bir parça test sürecinden geçirilinceye kadar devam eder. Tüm parçalar bitince ortalama değer hesaplanır.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, verilen ön işlem süreçleri, öznitelik çıkarımı, öznitelik seçimi ve k-NN algoritmasının performansının elde edilmesinde MATLAB programı kullanılmıştır. Çalışma sonuçları iki kısma ayrılmıştır. Birinci kısımda elde edilen zaman ve frekans alanı ölçümlerinin tamamı kullanılmıştır. k-NN algoritması için farklı k değerleri, dört farklı uzaklık ölçütü ve iki farklı normalizasyon işlemi için sonuçlar hesaplanmıştır. İkinci kısımda, elde edilen özniteliklere geriye doğru eleme yöntemi uygulanmış ve seçilen öznitelikler kullanılarak k-NN algoritması için farklı k değerleri, dört farklı uzaklık ölçütü ve iki farklı normalizasyon işlemi ile sonuçlar tekrarlanmıştır. Tüm çalışmada veriler 10-fold çapraz geçerlilik yöntemi kullanılarak test edilmiştir.

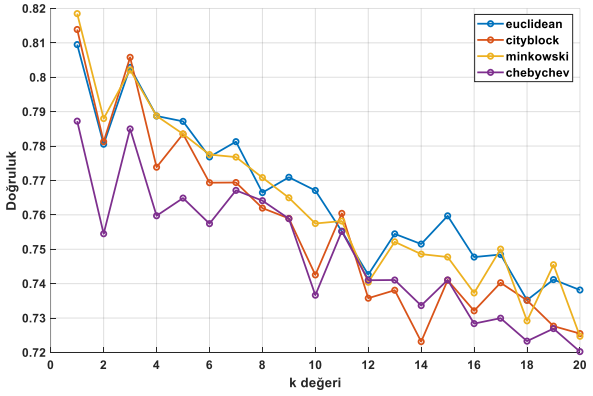
3.1. Tüm Öznitelikler ile Performans Sonuçları

Bu kısımda elde edilen 20 adet öznitelik kullanılmıştır. Bu özniteliklerin 8 tanesi zaman alanı 12 tanesi frekans alanına aittir. k-NN algoritmasındaki uzaklık ölçütleri 'Euclidean', Cityblock', 'Minkowski', 'Chebychev' ile k değerinin 1-20 arasındaki değerleri için Şekil 2'de doğruluk değerleri verilmiştir. Normalizasyon uygulanmamış ve tüm öznitelikler ile k=15 için en yüksek %54,6 oranında doğruluk değeri bulunmuştur. En yüksek doğruluk değeri 'Cityblock' uzaklık ölçütü ile elde edilmiştir. En kötü performans değeri 'Chebychev' uzaklık ölçütü ile k=12 değerinde %48,8 olarak kaydedilmiştir.

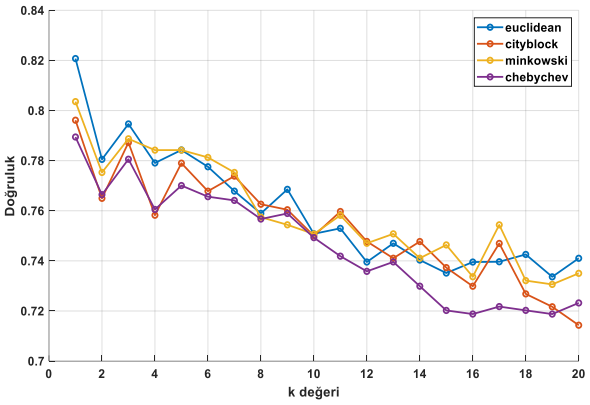


Şekil 2. Farklı uzaklık ölçütlerine göre normalize edilmemiş veriler için k değerlerine göre doğruluk grafiği.

Verilere z-skor normalize işlemi uygulandığında elde edilen veriler üzerinden çıkarılan tüm öznitelikler kullanıldığındaki sonuçlar Şekil 3'de sunulmuştur. Z-skor ile normalize edilen verilerde kayda değer bir yükseliş görülmektedir. k=1 değeri için 'Minkowski' uzaklık ölçütü ile %81,9 doğruluk değerine ulaşıldığı görülmektedir. K değerinin artması ile genel doğruluk değerinin düştüğünü de görmekteyiz. En kötü sonucun k=20 için 'Chebychev' uzaklık ölçütünde %72 olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 4'de min-max normalizasyon işlemi uygulanmasıyla elde edilen veriler üzerinden çıkarılan tüm öznitelikler kullanıldığındaki sonuçlar detaylı bir şekilde verilmiştir. Min-max nomalizasyon işlemi z-skor normalizasyon işlemine göre az da olsa performans artışı sergilemiştir. Sonuçlara bakıldığında, k=1 değeri için 'Euclidean' uzaklık ölçütü ile %82,1 oranında doğruluk değerine ulaşıldığı görülmektedir. Bu sonuçlarda da k değerinin azalması genel performansı düşürmektedir. En kötü sonucun k=20 için 'Minkowski' uzaklık ölçütünde %71,2 olarak elde edildiği görülmektedir.



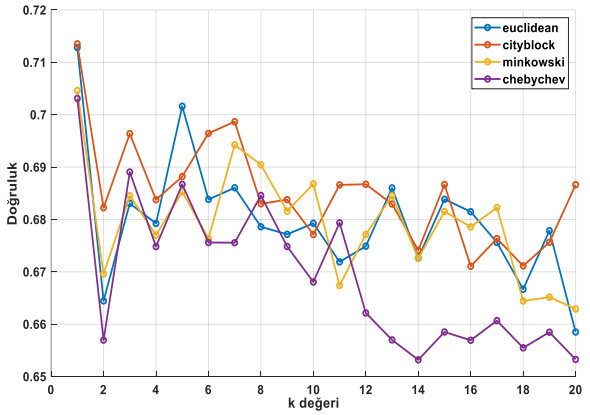
Şekil 3. Farklı uzaklık ölçütlerine göre z-skor ile normalize edilmiş veriler için k değerlerine göre doğruluk grafiği.



Şekil 4. Farklı uzaklık ölçütlerine göre min-max ile normalize edilmiş veriler için k değerlerine göre doğruluk grafiği.

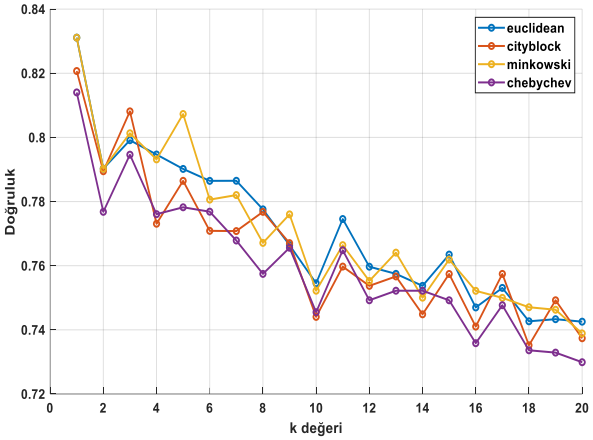
3.2. Geriye Doğru Eleme Yöntemi Kullanılarak Seçilen Özniteliklerin Performans Sonuçları

Çalışmanın bu aşamasında, elde edilen tüm öznitelikler geriye doğru eleme yöntemi ile seçilen öznitelikler kullanılarak çalışma sonuçları sunulmuştur. Normalizasyonlu ve normalizasyon olmadan seçilen özniteliklerin sayısı aynıdır ve toplam 13 adettir. Zaman alanı ölçümlerinden Ortalama, Standart Sapma, Basıklık, Çarpıklık, Hurst üssü olmak üzere 5 adet öznitelik seçilmiştir. Frekans alanı ölçümlerinde ise Delta,Teta, Gama, (Teta/Alfa), (Teta/Beta), (Teta + Alfa)/(Beta + Alfa), (Gama/Delta) ve (Gama+Beta)/(Delta+Alfa) olmak üzere 8 adet öznitelik seçilmiştir. Öznitelik seçiminin sonuçlara olumlu etkileri olmuştur. Normalize edilmemiş veriler üzerinden çıkarılan 13 öznitelik ile elde edilen sonuçlar Şekil 5'de verilmiştir. Genel doğruluk değerinin %54,6'dan %71,4'e çıktığı görülmektedir. En yüksek sonuç k değerinin 1 olduğu ve 'Cityblock' uzaklık ölçütünde %71,4 olarak elde edildiği görülmektedir. Fakat normalize edilmemiş verilerden elde edilen sonuçların hala düşük olduğu görülmektedir. K değerinin artması ile birlikte genel doğruluk değerinin düştüğü açıkça ifade edilebilir. En kötü sonucun k değerinin 20 olduğu 'Chebychev' uzaklık ölçütündedir. Burada elde edilen sonuç %65,4'tür.



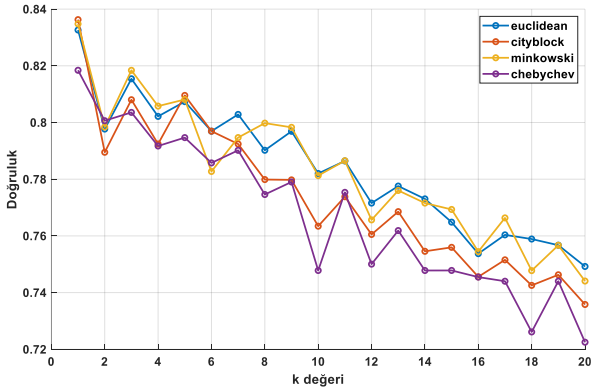
Şekil 5. Farklı uzaklık ölçütlerine göre normalize edilmemiş veriler üzerinden seçilen öznitelikler için k değerlerine göre doğruluk grafiği.

Min-max yöntemi sonucunda elde edilen özniteliklere yapılan seçim ile kullanılan 13 özniteliğin performansı Şekil 6'da verilmiştir. Z-skor yöntemine göre az daha düşük çıkan doğruluk değeri %83,2'dir. Bu sonuç k=1 için 'Minkowski' uzaklık ölçütünde elde edilmiştir. Öznitelik seçiminin sonuca pozitif yansıdığı görülmektedir.



Şekil 6. Farklı uzaklık ölçütlerine göre min-max ile normalize edilmiş veriler üzerinden seçilen öznitelikler için k değerlerine göre doğruluk grafiği.

Son olarak, Z-skor ile normalize edilmiş veriler üzerinden elde edilen özniteliklerden seçilen 13 adet ölçümden elde edilen sonuçlar Şekil 7'de sunulmuştur. Sonuçların az da olsa arttığı söylenebilir. Öznitelik seçimi yapılmadığında %81,9 olan doğruluk değeri burada %83,6 olarak elde edilmiştir. %1,7 oranında bir artış gözlenmiştir. En yüksek sonucun k=1 için 'Cityblock' uzaklık ölçütünde %83,6 olarak elde edildiği görülmektedir. Burada da k değerine göre doğruluk değerinin azaldığını açıkça görülmektedir.



Şekil 7. Farklı uzaklık ölçütlerine göre z-skor ile normalize edilmiş veriler üzerinden seçilen öznitelikler için k değerlerine göre doğruluk grafiği.

Tablo 2'de sunulan literatür çalışmaları başta olmak üzere EEG sinyallerinin SZ teşhisindeki etkinliği konusunda pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar, EEG'nin SZ hastalarında karakteristik değişimler içerdiğini göstermekte ve farklı öznitelik çıkarma ile sınıflandırma yöntemleri kullanarak yüksek başarı oranları elde etmektedir. Ancak, mevcut çalışmada kullanılan k-NN

algoritmasının doğruluk oranı, literatürde bildirilen derin öğrenme veya gelişmiş öznitelik çıkarma yöntemlerine kıyasla daha düşük kalmıştır. Bunun başlıca nedenleri şunlardır:

- Derin öğrenme tabanlı model ve yaklaşımlar, EEG sinyallerinden daha karmaşık ve yüksek seviyeli özellikleri otomatik olarak öğrenebilmektedir. Geleneksel öznitelik çıkarma yöntemleri belirli varsayımlara dayandığından, öğrenilen özniteliklerin veri kümesi üzerindeki ayrım gücü sınırlı kalabilmektedir.
- Daha gelişmiş öznitelik çıkarma yöntemleri, yalnızca frekans tabanlı ölçümlerle değil, zaman-frekans analizi, faz senkronizasyonu ve bağlantısallık ölçümleri gibi daha karmaşık biyomarker'lar ile de desteklenmektedir.
- k-NN algoritması, küçük veri kümelerinde etkili olabilmektedir. Ancak büyük ve yüksek boyutlu veri kümelerinde performansı düşebilir. Uzaklık temelli bir yöntem olduğu için, veri dağılımına ve gürültüye karşı oldukça hassastır.

Bu bağlamda, çalışmada kullanılan yöntemlerin geliştirilmesi için alternatif öznitelik çıkarma ve sınıflandırma yaklaşımlarına yönelmek faydalı olacaktır. Özellikle, zaman-frekans analizi, dalgacık dönüşümleri veya derin öğrenme tabanlı özellik çıkarımı tekniklerinin kullanılması, SZ teşhisinde daha yüksek doğruluk oranları sağlayabilir. Bunun yanı sıra, genelleme kabiliyetinin artırılması için daha büyük ve çeşitli veri kümeleri ile modelin eğitilmesi gereklidir. Çalışmada kullanılan veri kümesi 84 EEG kaydından oluşmaktadır ve sınırlı bir hasta grubunu temsil etmektedir. Büyük ölçekli veri setlerinin kullanılması, modelin farklı hasta popülasyonları üzerindeki etkinliğini değerlendirmek ve klinik uygulanabilirliği artırmak için kritik öneme sahiptir. Özellikle, farklı yaş grupları, hastalık evreleri ve ilaç kullanım durumlarını içeren veri setleri, modelin sağlamlığını test etmek açısından gereklidir. Son olarak, elde edilen özniteliklerin şizofreni tanısındaki rolü değerlendirildiğinde, özellikle belirli frekans bantlarındaki değişimlerin hastalığın nörofizyolojik temelleri ile ilişkili olduğu görülmektedir. Önceki çalışmalar da (Santos-Mayo vd., 2016; Das ve Pachori, 2021) düşük frekans bantlarının (delta ve teta) SZ hastalarında belirgin şekilde değiştiğini ve bu değişimlerin tanısal değer taşıdığını göstermektedir. Bu çalışmada da, özellikle frekans tabanlı oranların SZ teşhisinde belirli bir ayırt ediciliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, klinik olarak tanı koyma sürecinde bu özniteliklerin tek başına yeterli olup olmadığı daha geniş çaplı çalışmalarla doğrulanmalıdır. Özetle, bu çalışma EEG tabanlı özniteliklerin SZ teşhisinde kullanılabilirliğini ortaya koyarken, kullanılan normalizasyon yöntemlerinin ve sınıflandırma algorimasının parametrelerinin sonuçları değiştirdiği görülmektedir. Derin öğrenme temelli yaklaşımlar ve daha büyük veri kümeleri ile yapılacak ileri çalışmaların modelin genel başarımını artırabileceğini göstermektedir.

Tablo 2. EEG Verileri ile SZ Tespiti Yapan Çalışmaların Karşılaştırılması.

Yazar/yıl	Data	Yöntem	Doğruluk(%)
Kim vd., 2015	Sağlıklı: 90 SZ: 90	Spektral Yaklaşım, Alt bant analizi + ROC	62,20
Dvey-Aharon vd., 2015	Sağlıklı: 25 SZ: 25	Time-frequency feature optimization-based feature extraction + LDA	88,70
Piryatinska vd., 2017	Sağlıklı: 39 SZ: 45	Epsilon-complexity function + RF	85,30
Santos-Mayo vd., 2016	Sağlıklı: 31 SZ: 16	Zaman-frekans alanı analizi, Kanal kümeleme tekniği+SVM, ÇKAA	93,40
Das and Pachori, 2021	Sağlıklı: 14 SZ: 14	Hjorth moments on multivariate IMFs+SVM	98,90
Türk vd., 2024	Sağlıklı: 39 SZ: 45	Discrete Wavelet Tranform + Resnet52	92,94
Bu çalışma	Sağlıklı: 39 SZ: 45	Zaman ve frekans alanı ölçümleri,geriye doğru eleme, normalizasyon+k-NN	83,62

4. Sonuç

Bu çalışmada, SZ hastalarının tespitinde EEG verileri kullanılarak elde edilen zaman ve frekans alanı ölçümlerinin farklı uzaklık ve k değerleri için k-NN algoritmasının performansları incelenmiştir. Veriler iki farklı normalizasyon işlemi ile normalize edilmiştir. Geriye doğru eleme yöntemi ile öznitelik seçimi yapılıp sonuçlar tekrarlanmıştır. Z-skor normalizasyon uygulanmış veriler ile elde edilen özniteliklere geriye doğru eleme yöntemi uygulandığında k=1 ve 'Cityblock' uzaklık ölçütü için en yüksek %83,6 doğruluk değerine ulaşılmıştır. Z-skor normalizasyonu, veriyi ortalaması sıfır ve standart sapması bir olacak şekilde dönüştürmesi ve tüm özellikleri dengeli şekilde değerlendirmesine olanak

sağladığı için daha yüksek başarım gösterdiği düşünülmektedir. Ayrıca 'Cityblock' uzaklık ölçütü ise mesafeyi yalnızca koordinat eksenleri boyunca hesaplayan bir yaklaşım sunması ve çıkarılan özniteliklerin yapısına bağlı olarak daha uygun bir mesafe ölçümü sunması bu çalışma için daha uygun olduğu değerlendirilmektedir. Elde edilen bu bulguların literature katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Gelecek çalışmalarda, literatüre göre daha yüksek performans elde edebilmek için, frekans alanı ölçümleri ve lineer olmayan öznitelik sayısı arttırılacak, hesaplama yükü fazla olan algoritmalar ile sonuçlar denenecektir. Detaylı parametrik çalışmalar gerçeleştirilip sunulacaktır.

Katkı Oran Beyanı

Yazarların katkı yüzdesi aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır**.**

	A.N.	B.S.
K	50	50
T	50	50
Y	60	40
VTI	40	60
VAY	50	50
KT	50	50
YZ	50	50
KI	50	50
GR	50	50
PY	50	50
FA	50	50

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

Akcan G, Taşören AB. 2020. Genç yetişkinlerde çocukluk çağı olumsuz yaşantıları, öz-şefkat ve duygu düzenleme becerileri depresyon belirtilerini yordar mı? Bogazici Univ J Educ, 37(2): 59-80.

Aktay M, Hızlı Sayar G. 2021. Psikiyatrik bozuklukların psikososyal yönü. Kıbrıs Türk Psikiyatri ve Psikoloji Derg, 3(1): 48-55.

Bashivan P, Rish I, Heisig S. 2016. Mental state recognition via wearable EEG. arXiv, arXiv:1602.00985.

Birnbaum R. 2023. Rediscovering tandem repeat variation in schizophrenia: challenges and opportunities. Transl Psychiatry, 13(1): 402.

Borisov SV, Kaplan AY, Gorbachevskaya NL, Kozlova IA. 2005. Analysis of EEG structural synchrony in adolescents with schizophrenic disorders. Human Physiol, 31: 255-261.

Boz C, Özdemir M, Çalgı B. 2020. Mental hastalıkların prevalansına göre OECD ülkelerinin çok boyutlu analizi ve MOORA yöntemi ile sıralanması. Gümüşhane Üniv Sosyal Bilim Derg, 11: 245-256.

da Silveira TL, Kozakevicius AJ, Rodrigues CR. 2016. Automated drowsiness detection through wavelet packet analysis of a single EEG channel. Expert Syst Appl, 55: 559-565.

Das K, Pachori RB. 2021. Schizophrenia detection technique using multivariate iterative filtering and multichannel EEG signals. Biomed Signal Process Cont, 67: 102525.

Dvey-Aharon Z, Fogelson N, Peled A, Intrator N. 2015. Schizophrenia detection and classification by advanced analysis of EEG recordings using a single electrode approach. PLoS One, 10(4): e0123033.

Eoh HJ, Chung MK, Kim SH. 2005. Electroencephalographic study of drowsiness in simulated driving with sleep deprivation. Int J Ind Ergon, 35(4): 307-320.

Erdoğan YE, Narin A. 2021. COVID-19 detection with traditional and deep features on cough acoustic signals. Comput Biol Med, 136: 104765.

Farahdiba S, Kartini D, Nugroho RA, Herteno R, Saragih TH. 2023. Backward elimination for feature selection on breast cancer classification using logistic regression and support vector machine algorithms. IJCCS, 17(4): 429-440.

Hosseini SA, Naghibi-Sistani MB. 2011. Emotion recognition method using entropy analysis of EEG signals. Int J Image Graphics Signal Process, 3(5): 30-38.

Jap BT, Lal S, Fischer P, Bekiaris E. 2009. Using EEG spectral components to assess algorithms for detecting fatigue. Expert Syst Appl, 36(2): 2352-2359.

Jin H, Mosweu I. 2017. The societal cost of schizophrenia: A systematic review. Pharmacoecon, 35(1): 25-42.

Kamble A, Ghare P, Kumar V. 2022. Machine-learning-enabled adaptive signal decomposition for a brain-computer interface using EEG. Biomed Signal Process Control, 74: 103526.

Karal E, Atak H. 2022. Çocukluk çağı ruhsal travmaları üzerine kavramsal bir çalışma. Muş Alparslan Univ J Fac Educ, 2(1), 82-103.

Kim JW, Lee YS, Han DH, Min KJ, Lee J, Lee K. 2015. Diagnostic utility of quantitative EEG in un-medicated schizophrenia. Neurosci Lett, 589: 126-131.

Larson MK, Walker EF, Compton MT. 2010. Early signs, diagnosis and therapeutics of the prodromal phase of schizophrenia and related psychotic disorders. Expert Rev Neurother, 10(8): 1347-1359.

Lotte F, Bougrain L, Cichocki A, Clerc M, Congedo M, Rakotomamonjy A, Yger F. 2018. A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces: a 10 year update. J Neural Eng.

Narin A. 2020. Parkinson hastalarının tespitinde karınca koloni algoritması ile seçilen özniteliklerin performansa etkisi. Düzce Univ J Sci Technol, 8(4): 2443-2454.

Piryatinska A, Darkhovsky B, Kaplan A. 2017. Binary classification of multichannel-EEG records based on the ϵ-complexity of continuous vector functions. Comput Methods Programs Biomed, 152: 131-139.

Rizvi A, Safwi SR, Usmani MA. 2024. Schizophrenia: Disability, clinical insights, and management. Cham: Springer Nature Bern, Switzerland, pp: 1-12.

Santos-Mayo L, San-José-Revuelta LM, Arribas JI. 2016. A computer-aided diagnosis system with EEG based on the P3b wave during an auditory odd-ball task in schizophrenia. IEEE Trans Biomed Eng, 64(2): 395-407.

Şenyer Yapıcı İ, Uzun Arslan R. 2024. A machine learning-based decision support system design to predict maternal health risk groups during pregnancy. BSJ Eng Sci, 7(3): 509-520.

Singh D, Singh B. 2020. Investigating the impact of data normalization on classification performance. Applied Soft Computing, 97: 105524.

Subasi A. 2007. EEG signal classification using wavelet feature extraction and a mixture of expert model. Expert Syst Applicat, 32(4): 1084-1093.

Sürücü M, İşler Y, Kara R. 2023. Paroksismal atriyal fibrilasyonun 30 dakikalık kalp hızı değişkenliği analizi kullanılarak teşhisinde kalp hızı ve öznitelik normalizasyon yöntemlerinin etkisi. Karaelmas J Sci Eng, 13(1): 191-204.

Türk Ö, Aldemir E, Acar E, Ertuğrul ÖF. 2024. Diagnosis of schizophrenia based on transformation from EEG sub-bands to the image with deep learning architecture. Soft Comput, 28(9): 6607-6617.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1632697

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)
Cilt 8 - Sayı 3: 704-714 / Mayıs 2025
(Volume 8 - Issue 3: 704-714 / May 2025)

AĞIZ İÇİ GÖRÜNTÜLERİN DERİN ÖĞRENME İLE ANALİZİ: CNN MODELLERİNİN SINIFLANDIRMA PERFORMANSI

Sena ÇELİK[1]*

[1]*Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Faculty of Bucak Computer and Information, Department of Information Systems Engineering, 15300, Bucak, Burdur, Türkiye*

Özet: Ağız içi görüntülerin sınıflandırılması, özellikle gelişmiş görüntüleme teknolojileri ve yapay zekanın (AI) ortaya çıkmasıyla birlikte, modern diş teşhisinin kritik bir yönüdür. Transfer öğrenme ve topluluk tekniklerinin entegrasyonu, bu amaçla tasarlanan modellerin performansını artırmada ümit verici sonuçlar göstermiştir. Bu çalışmada, ResNet152V2, DenseNet201, InceptionResNetV2, ConvNeXtBase ve Xception gibi derin öğrenme modelleri tek tek ve topluluk modeli olarak test edilmiştir. Kullanılan veri seti, farklı yaş gruplarından bireylerin ağız içi görüntülerini içermektedir. Modellerin eğitimi ve değerlendirilmesi aşamalarında veri ön işleme, normalizasyon ve ince ayar (fine-tuning) gibi teknikler uygulanmıştır. Doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1 skoru ve ROC-AUC gibi metrikler kullanılarak performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ResNet152V2 + DenseNet201 topluluk modelinin en yüksek doğruluk oranına (%89,9) ve 0,9934 ROC-AUC değerine ulaştığını göstermektedir. Bu bulgular, derin öğrenme tabanlı yaklaşımların diş hekimliği uygulamalarında otomatik teşhis, tedavi planlaması ve uzaktan hasta değerlendirme gibi alanlarda büyük potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, diş morfolojisi ve çene yapılarının analizi için yapay zeka tabanlı sistemlerin geliştirilmesi, klinik süreçleri hızlandırarak diş hekimlerine karar destek mekanizmaları sağlayabilir. Gelecekteki çalışmalar, daha büyük ve çeşitli veri setleri kullanarak modelin genelleme yeteneğini artırmaya odaklanmalıdır.

Anahtar kelimeler: Derin öğrenme, Ağız içi görüntü analizi, CNN modelleri, Diş sınıflandırma

Analysis of Intraoral Images Using Deep Learning: Classification Performance of CNN Models

Abstract: The classification of intraoral images has become a critical aspect of modern dental diagnosis, particularly with the emergence of advanced imaging technologies and artificial intelligence (AI). The integration of transfer learning and ensemble techniques has shown promising results in enhancing the performance of models designed for this purpose. In this study, deep learning models such as ResNet152V2, DenseNet201, InceptionResNetV2, ConvNeXtBase, and Xception were tested individually and as an ensemble. The dataset includes intraoral images from individuals of various age groups. Data preprocessing, normalization, and fine-tuning techniques were applied during model training and evaluation. Performance analysis was conducted using accuracy, precision, recall, F1-score, and ROC-AUC metrics. The results indicate that the ResNet152V2 + DenseNet201 ensemble model achieved the highest accuracy (89.9%) and ROC-AUC score (0.9934). These findings highlight the great potential of deep learning-based approaches in dental applications, such as automatic diagnosis, treatment planning, and remote patient assessment. Furthermore, the development of AI-based systems for analyzing dental morphology and jaw structures can accelerate clinical workflows by providing decision-support mechanisms for dentists. Future studies should focus on expanding dataset diversity to improve model generalization.

Keywords: Deep learning, İntraoral image analysis, CNN models, Dental classification

***Corresponding author:** Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Faculty of Bucak Computer and Information, Department of Information Systems Engineering, 15300, Bucak, Burdur, Türkiye
E mail: scelik@mehmetakif.edu.tr (S. ÇELİK)
Sena ÇELİK https://orcid.org/0000-0001-9277-7623

Gönderi: 3 Şubat 2025 **Received:** February 3, 2025
Kabul: 21 Mart 2025 **Accepted:** March 21, 2025
Yayınlanma: 15 Mayıs 2025 **Published:** May 15, 2025

Cite as: Çelik S. 2025. Analysis of intraoral images using deep learning: classification performance of CNN models. BSJ Eng Sci, 8(3): 704-714.

1. Giriş

Tıbbi bilgilerin kullanımı sağlık bilincini artırmada ve sağlık hizmetlerini en iyi standartlara yükseltmede hayati öneme sahiptir. Ağız içi görüntülerin kullanımı diş hekimlerine, ortodontistlere ve patologlara hastaların diş problemlerini anlamaları ve teşhis etmeleri konusunda yardımcı olmaktadır. Ancak bu görüntülerin analizi ve yorumlanması zaman alıcı ve zorlu olabilmektedir. Bu çalışma, ağız içi görüntüleri kullanılarak otomatik diş bölgesinin sınıflandırılması ve bu alandaki problemlerin çözümünde uzmanlara yardımcı olması amaçlanmıştır.

Ağız içi görüntülerinin kullanıldığı alanlar geniş bir yelpazeye sahiptir. Diş hekimliği uygulamalarında, ağız içi görüntüleri; diş eti hastalıkları, diş çürükleri, diş minesindeki hasarlar, diş yapısı ve dişler arasındaki ilişkilerin incelenmesinde kullanılmaktadır. Bununla birlikte dişlerin düzeltilmesi, yüz gelişiminin izlenmesi ve çene hareketlerinin analizinde değerli bilgiler sağlamaktadır. Ayrıca tümörlerin sınıflandırılması ve tedavi planlaması gibi pek çok aşamada ağız içi görüntüleri kullanılmaktadır.

Son yıllarda derin öğrenme teknikleri, özellikle Evrişimsel Sinir Ağları (CNN'ler), ağız içi görüntülerin analizi için önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. CNN'ler, görüntülerden özellikleri otomatik olarak çıkarabilme

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

yetenekleri sayesinde, diş çürükleri, periodontal hastalıklar ve diğer ağız sağlığı sorunlarının tespitinde klinisyenlere büyük ölçüde yardımcı olmaktadır. Bu yöntemler, geleneksel teşhis yöntemleriyle karşılaştırıldığında yüksek doğruluk oranları sunarak diş hekimliği alanında devrim yaratmaktadır. Örneğin, Kühnisch vd. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, 3.293 bitewing radyografisi analiz edilerek CNN modellerinin diş çürüklerini tespit etme başarısı değerlendirildi. Sonuçlar, Alan Altı Eğrisi (AUC) değerlerinin 0,845 ile 0,917 arasında değiştiğini ve %80'in üzerinde tanısal doğruluk sağlandığını göstermiştir. Benzer şekilde, Tan vd. (2024), yapay zekanın farklı görüntüleme yöntemlerinde diş hekimlerine eşdeğer performans sergileyerek diş hastalıkları teşhisinde yüksek doğruluk sunduğunu ortaya koymuştur.

Görüntü işleme teknikleri, ağız içi görüntülerinin iyileştirilmesi, analizi ve teşhisi için kullanılan yöntemleri içerir. Bu teknikler arasında görüntü iyileştirme, segmantasyon, özellik çıkarma ve sınıflandırma gibi adımlar bulunmaktadır. Görüntü işleme teknikleri, ağız içi sağlık sorunlarının teşhisi ve takibi için önemli bir araç olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte derin öğrenme ve yapay zeka uygulamaları, ağız içi görüntülerinin otomatik analizi ve tanımlanması için kullanılan ileri düzey teknolojilerdir. Bu uygulamalar büyük veri kümeleri üzerinde eğitilmiş derin sinir ağları ve öğrenme modelleri kullanılarak ağız içi görüntülerinin patolojik bölgelerini tanımlayabilmektedir. Derin öğrenme ve yapay zeka uygulamalarının ağız içi görüntü analizindeki potansiyeli oldukça fazladır. CNN modelleri, yalnızca çürük tespiti ile sınırlı kalmayıp periodontal hastalıkların belirlenmesi, fissür örtücülerin analizi, endodontik tedavilerin değerlendirilmesi ve ortodontik planlamalar gibi birçok farklı alanda uygulanmaktadır. Khanagar vd. (2021), yapay zekanın periodontal olarak tehlikeye girmiş dişleri tahmin edebilme potansiyelini vurgularken, Alalharith vd. (2020) ise diş eti iltihabının erken teşhisinde derin öğrenme modellerinin etkinliğini ortaya koymuştur.

Maksiller ve Mandibular özellikler; dişlerin temel özelliklerinden biri cinsiyetler ve etnik gruplar arasında önemli ölçüde değişebilen boyutları ve şekilleridir. Soundarya vd. (2021), maksiller kesici diş genişliği ve köpek dişi genişliği gibi çeşitli endekslerin, diş morfolojisindeki cinsel dimorfizmi belirlemedeki önemini vurgulamıştır. Bulguları, maksiller ve mandibular dişlerin adli ve antropolojik bağlamlarda kullanılabilecek önemli boyut farklılıkları sergilediğini göstermektedir. Benzer şekilde, Al-Khannaq vd. (2022) özellikle karışık dişlenme döneminde diş sıkışıklığını önlemek için kesici dişlerin boyutlarına göre köpek dişlerinin ve küçük azı dişlerinin genişliklerinin tahmin edilmesinin önemini vurgulamıştır. Bu tahmin yeteneği ortodontik planlama için önemlidir ve optimum diş arkı hizalaması elde etmeye yardımcı olabilmektedir.

Maksiller ve mandibular dişlerin işlevsel yönleri oklüzyon ve genel ağız sağlığında kritik bir rol oynar. Yotsuya vd. (2020), maksiller ve mandibular arklar arasındaki uyumsuzluğun anormal oklüzyona yol açabileceğini ve bunun da çene üzerinde artan strese ve temporomandibular bozukluklar gibi olası komplikasyonlara neden olabileceğini tartışmıştır. Bu, temporomandibular gelişiminde oklüzyonun önemini vurgulayan ve uygunsuz hizalamanın önemli rahatsızlığa ve işlevsel bozukluğa yol açabileceğini belirten Kanter vd. (2018)'nin çalışmasıyla daha da desteklenmektedir. Palkit vd. (2020) tarafından vurgulandığı gibi, oklüzyon ve diş estetiği arasındaki ilişki de önemli bir hususturur. Çalışmada Sınıf II maloklüzyonlu hastalarda maksiller ve mandibular taban uzunluklarındaki farklılıkların diş sıkışıklığıyla nasıl ilişkili olduğunu araştırmıştır.

İşlevsel hususlara ek olarak, maksiller ve mandibular dişler arasındaki anatomik farklılıklar diş çürüğü ve diğer patolojilerin yaygınlığını etkileyebilir. Rithanya (2023) yaptığı çalışmada, özellikle azı dişleri olmak üzere posterior dişlerin, bakteri barındırabilen çoklu oluklar ve çukurlar içeren karmaşık morfolojileri nedeniyle çürüğe karşı daha yüksek bir duyarlılığa sahip olduğunu belirlemiştir. Bu duyarlılık, Wang vd. (2020) tarafından bildirilen değişken süngerimsi kemik yoğunluklarının kanıtladığı gibi, maksilla ve mandibuladaki anatomik farklılıklarla daha da karmaşıklaşmış ve bu da çevredeki dişlerin stabilitesini ve sağlığını etkileyebileceği bildirilmiştir. Ayrıca, García-Gil vd. (2023) tarafından yapılan çalışma, arka dişlerin sürme dizisinin diş sıkışıklığı ve ark boyutlarıyla ilişkili olduğunu ve diş morfolojisi ile ağız sağlığı sonuçları arasındaki ilişkiyi daha da karmaşık hale getirdiğini göstermiştir. Üst ve alt çene dişlerinin gelişimsel yönleri de, özellikle diş sürmesi ve ortodontik müdahalelerin zamanlaması ile ilgili olarak dikkate değerdir. Corns vd. (2021), çoğu çalışmanın alt çene dişlerinin kök gelişimine odaklandığını ve bunun genellikle ektopik pozisyona daha yatkın olan üst çene dişleri ile ilgili bilgi eksikliğine işaret ettiğini belirtmiştir. Bu, diş sürmesinin dinamiklerini ve ortodontik tedavi için etkilerini daha iyi anlamak için her iki kemeri de kapsayan kapsamlı çalışmalara olan ihtiyacı vurgulamaktadır. Ek olarak, Ueno vd. (2019) tarafından yapılan diş kemeri formu üzerine yapılan araştırma, kesici dişler arası mesafe ve meziodistal kron genişliği gibi çeşitli faktörlerin, etkili ortodontik planlama için kritik olan diş kemerinin genel şeklini ve boyutunu önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur.

Ayrıca, diş morfolojisini etkileyen genetik ve çevresel faktörler oldukça önemli bir faktör olarak ön plana çıkmaktadır. Khalaf vd. (2022), genetik yatkınlıkların diş sayısı, boyutu ve şekli bakımından farklılıklara nasıl yol açabileceğini, özellikle de fazladan dişler ve bunların alt çene kesici dişlerinin morfolojisi üzerindeki etkilerini tartışmışlardır. Bu genetik değişkenlik, farklı popülasyonların kişiye özel tedavi stratejileri gerektiren farklı diş özellikleri gösterebilmesi nedeniyle, ortodonti ve restoratif diş hekimliğinde kişiselleştirilmiş yaklaşımların önemini vurgulamaktadır.

Üst çene ve alt çene dişleri arasındaki etkileşim, dental

implantlar ağız içi görüntülerin değerlendirilmesi açısından önem arz etmektedir. Wimalarathna vd. (2021) tarafından yapılan çalışma, implant yerleştirme için hayati yapıların ve mevcut kemiğin yerini anlamanın önemini vurgulayarak, her iki kemeri de etkili bir şekilde değerlendirmek için hassas görüntüleme tekniklerine olan ihtiyacı vurgulamıştır. Bu durum, implant prosedürlerinin başarısını etkileyebilecek olan üst çene ve alt çene arasındaki kemik yoğunluğu ve morfolojideki anatomik farklılıklar göz önüne alındığında özellikle önemlidir. Sonuç olarak, dişlerin maksiller ve mandibular yönlerine ilişkin farklı görüşler anatomik, işlevsel, gelişimsel ve genetik etkiler de dahil olmak üzere geniş bir yelpazedeki faktörleri kapsar. Bu iki ark arasındaki farklar diş sağlığını, tedavi planlamasını ve diş anomalilerinin önlenmesini anlamak için kritik öneme sahiptir. Araştırmalar gelişmeye devam ettikçe, diş hekimlerinin hasta sonuçlarını iyileştirmek ve ağız sağlığını optimize etmek için bu bulguları uygulamalarına entegre etmeleri önemlidir.

Belirtilen çalışmalar ve daha birçok çalışmanında ışığında ağız içi görüntülerin önemi anlaşılmaktadır. Bu çalışmada, derin öğrenme tekniklerinin kullanılan veri setindeki ağız içi bölgesel segmentasyonuna katkıda bulunması planlanmaktadır. Kullanılan veri kümesinde, farklı görünümlere sahip dişlerin tanımlanması çeşitli algoritmalar ve yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Çalışmada birçok model test edilerek uygun olduğu düşünülen beş farklı model için çalışmalar yapılmıştır. Bu modeller; ResNet152V2, DenseNet201, InceptionResNetV2, ConvNeXtBase ve Xception' dır. Kullanılan modellerin tek başına performansları ile birlikte topluluk modeli geliştirilerek çalışmanın boyutu üst seviyeye çıkarılmış ve deneysel çalışmaların performansı artırılmıştır. Bu yaklaşımın diş hekimleri için tanı ve tedavi süreçlerini kolaylaştırmanın yanı sıra uzaktan tedavi fırsatları sağlamada da faydalı olacağına inanılmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Veri Seti

Çalışmada ağız içi görüntülerini içeren bir veri seti kullanılmıştır. Veri seti, Bharati Vidyapeeth Deemed Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi ve Hastanesi tarafından Hindistan'da toplanmıştır. Paylaşılan veri setinde 9562 görüntü bulunmaktadır. Yaşları 1 – 14 arasında değişen çocuklara ait sağlıklı diş görüntüleri toplanmıştır. Maksiller(üst çene) ve mandibular(alt çene) görünümlerin ön, sağ, sol ve oklüzal(çiğneme yüzeyi) olmak üzere sekiz alt klasör halinde Mendeley veri deposunda saklanmaktadır (Chaudhary vd., 2024). Veri setindeki görüntüler anonimleştirilmiş olup kişisel veri içermemektedir. Dolayısıyla etik kuru onayı gerekmemektedir.

Bu veri seti, diş tıbbi teşhisinde yapay zeka uygulamalarını geliştirmek, aynı zamanda teşhis sürecini hızlandırmak ve makine öğrenmesi modellerini eğitmek amacıyla kullanılmasını amaçlamaktadır. Özellikle, diş çürüklerinin, periodontal hastalıkların ve gelişimsel anomalilerin tespiti için oldukça önemli bir kaynak olacağı düşünülmektedir. Verilerin toplanması, kontrollü ortamda ve sabit şartlarda gerçekleştirilmiştir. Görüntülerin çekimi akıllı telefon ile yapılmıştır. Bazı yüzeylerin daha iyi görüntülenmesi için intraoral aynalar kullanılmıştır. Ağız içi dişlerin net bir şekilde görünmesini sağlamak amacıyla yanak reaktörleri kullanılmıştır. Tüm işlemler sterilizasyon ekipmanları ile dezenfekte edilmiştir (Chaudhary vd., 2024). Veri setinin içeriği Tablo 1' de gösterilmiştir.

Tablo 1. Veri seti dağılımı

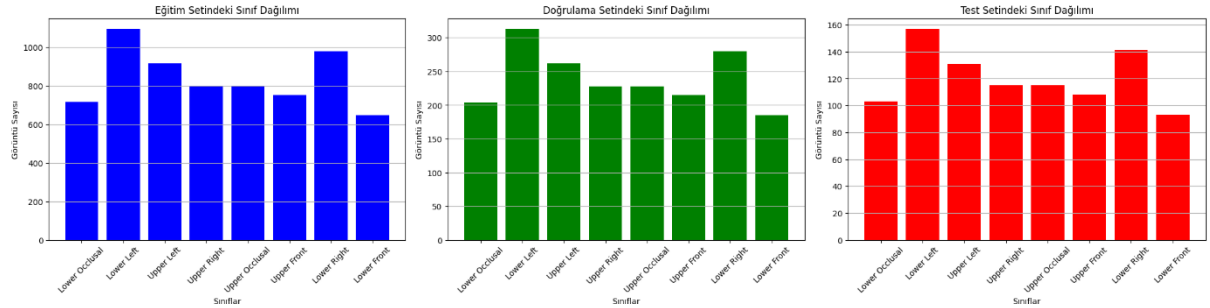
Kategori	Görüntü Sayısı	Tanım
Maksiller Ön Görünüm (Upper Front)	1075	Üst çene ön dişlerin tamamını içerir.
Maksiller Sağ Görünüm (Upper Right)	1143	Üst çenenin sağ yarısındaki dişleri içerir.
Maksiller Sol Görünüm (Upper Left)	1289	Üst çenenin sol yarısındaki dişleri içerir.
Maksiller Oklüzal Görünüm (Upper Occlusal)	1140	Üst çenedeki tüm dişlerin çiğneme yüzeylerini içerir.
Mandibular Ön Görünüm (Lower Front)	926	Alt çene ön dişlerin tamamını içerir.
Mandibular Sağ Görünüm (Lower Right)	1401	Alt çenenin sağ yarısındaki dişleri içerir.
Mandibular Sol Görünüm (Lower Left)	1566	Alt çenenin sol yarısındaki dişleri içerir.
Mandibular Oklüzal Görünüm (Lower Occlusal)	1022	Alt çenedeki tüm dişlerin çiğneme yüzeylerini içerir.

Veri seti oluşturulurken dişlerin belli koşullardan etkilenmemesi amacıyla dişler temizlenmiş ve kurutulmuştur. Ağız içi görüntüleri 5-7 cm mesafe ile doğrudan ve yanal açılardan çekilmiştir. Çekilen görüntülerin tutarlı oluşturulması için kırpma ve boyut standizasyon işlemleri yapılmıştır. Hazırlanmış 8 farklı klasör içindeki görüntülerin ön, sağ ve sol görünümlerinde 1280x550 piksel, oklüzal görünümlerinde 1024x768 piksel olarak ayarlanmıştır.

2.1. Veri Ön İşleme

Modellerin veri setini daha iyi öğrenmesi ve daha iyi genelleme yapması için ön işleme teknikleri uygulanmıştır. Veri setindeki görüntü sayıları aynı kalacak şekilde ön işleme adımları yapılmıştır. Veri setini modellere uygun hala getirmek için bazı işlemler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle görüntüler üzerinde normalizasyon yapılmıştır. Tüm görüntüler [0, 1] arasına ölçeklendirilmiştir. Bu işlem, modelin daha stabil öğrenmesini ve gradyan kaybolmalarının önlenmesi amacıyla yapılmıştır. Bu adım neticesinde piksel değerleri küçültülerek modelin daha iyi öğrenmesi sağlanmıştır.

Ayrıca veri setinin aşırı büyük değerlerle modelin kararsız çalışmasının engellenmesi amaçlanmıştır. Normalizasyon adımından sonra görüntülerin boyutlandırma işlemi yapılmıştır. Veri setinde bulunan görüntülerin boyutlarının farklı olması sebebiyle modellerin standart giriş boyutu gereksinimlerine uyması için tüm görseller tek bir boyuta çekilmiştir. Kullanılan modellerin gereksinimlerine dayanarak giriş formatına uygun olacak şekilde 224x224 olarak tüm görüntüler boyutlandırılmıştır.Bu işlemler yapıldıktan sonra mevcut sekiz klasörden orantılı olacak şekilde %70 eğitim seti, % 20 doğrulama seti ve %10 test seti olacak şekilde görüntüler sırasıyla 6705, 1915 ve 962 görüntü şeklinde ayrılmıştır. Kullanılan veri setine ait görüntülerin Şekil 1'de eğitim setine, doğrulama setine ve test setine ait dağılım gösterilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere veri setindeki mevcut sekiz klasörün orantılı bir şekilde üç set içerisine dağıtıldığı görülmektedir.



Şekil 1. Veri setinin eğitim, doğrulama ve test setindeki dağılımı.

2.2. Temel Model Eğitimi, Doğrulaması ve Seçimi

Ön işleme ve normalizasyon uygulanmış ağız içi diş röntgeni görüntüleri, daha sonra her bir Evrişimli Sinir Ağları (CNN) modeline giriş verisi olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan CNN modelleri ResNet152V2, DenseNet201, InceptionResNetV2, ConvNeXt ve Xception olarak belirlenmiştir. EfficientNetV2S ve EfficientNetB4 düşük performans gösterdiği için değerlendirme dışı bırakılmıştır. Seçilen modellerin daha önceki çalışmalarda başarılı sonuçlar vermesi ve transfer öğrenme yetenekleri ve eğitilebilirlik düzeyleri etkili olmuştur. ResNet152V2; derin katman yapısı ve residual bağlantılar ile daha iyi öğrenme sağlamaktadır. DenseNet201; her katmanın önceki katmanlardan doğrudan bağlantı almasını sağlayarak bilgi akışını iyileştirmektedir. InceptionResNetV2; çoklu ölçekli özellikleri öğrenerek detaylı analiz yapar. ConvNeXtBase; modern CNN mimarileri ile optimizasyon sağlamaktadır. Xception; derin ayrık evrişimler kullanarak hesaplama verimliliğini artırmaktadır. Her bir model için farklı amaçlar değerlendirilmek üzere seçilmiştir.

Tüm modeller, Adam optimizatörü ve ağırlık azalması (weight decay) ile optimize edilmiş, 0.0001 öğrenme oranı ile eğitilmiştir. Her bir model 30 epoch boyunca eğitim ve doğrulama süreçlerine tabi tutulmuş, aşırı uyumu (overfitting) önlemek amacıyla erken durdurma (early stopping) stratejisi uygulanmıştır. Modelin daha stabil ve güvenilir sonuçlar vermesi için veri artırma (data augmentation) teknikleri kullanılmamış, ancak veri seti eğitim sürecinden önce orantılı ve dengeli bir şekilde eğitim, doğrulama ve test alt kümelerine ayrılmıştır. Veri setindeki sekiz farklı sınıf, tüm alt kümelerde dengeli bir şekilde temsil edilecek şekilde bölünmüştür.

Tekil model performans değerlendirmesine ek olarak, topluluk modelleri de çalışmaya dahil edilmiştir. İkili topluluk modeli için ResNet152V2+DenseNet201, ResNet152V2+Xception, ResNet152V2+ConvNeXtBase ve ResNet152V2+InceptionResNetV2 kombinasyonları test edilmiştir. Çoklu (multi) topluluk modeli için ise üç veya daha fazla modelin birlikte kullanıldığı birleştirme teknikleri uygulanmıştır.

Modellerin eğitilmesi aşamasında ince ayar (fine-tuning) süreci oluşturulmuştur. İnce ayar önceden eğitilmiş bir modelin bazı katmanlarını açarak tekrar eğitmek olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda ImageNet veri kümesi ile eğitilmiş modellerin ağırlıkları kullanılmıştır. Modelin ilk katmanları dondurularak önceden öğrendiği özellikler korunmuştur. Modelin son katmanları tekrar açıklarak eğitime başlanmıştır. İlk olarak modelin önceden öğrendiği özellikleri kullanılarak sadece yeni sınıflandırma katmanları eğitilmiştir. İlk eğitimin ardından, modelin üst katmanları açılarak ince ayar yapılmıştır. Temel modelin üst katmanları bu aşamada serbest bırakılmıştır. Önceden eğitilmiş katmanlar daha düşük bir öğrenme oranı ile tekrar eğitilmiştir. Böylece model, önceki bilgilerini kaybetmeden yeni verilere adaptasyon sağlamıştır. İnce ayar işlemi transfer öğrenme ile başlarken , önce özellikleri çıkarılmış ve daha sonra ince ayar gerçekleştirilmiştir. Bu durum temel model eğitimini daha verimli hale getirerek doğruluğu artırmıştır. Yapılan işlemlere ait kodlama işlemindeb bir görüntü Şekil 2'de gösterilmiştir.

```
from tensorflow.keras.applications import
ResNet152V2
from tensorflow.keras.layers import
GlobalAveragePooling2D, Dense
from tensorflow.keras.models import Model

base_model = ResNet152V2(weights="imagenet",
include_top=False, input_shape=(224, 224, 3))

for layer in base_model.layers[:100]:
layer.trainable = False

x =
GlobalAveragePooling2D()(base_model.output)
x = Dense(256, activation="relu")(x)
output_layer = Dense(8, activation="softmax")(x)

model = Model(inputs=base_model.input,
outputs=output_layer)
model.compile(optimizer="adam",
loss="categorical_crossentropy",
metrics=["accuracy"])

model.summary()
```

Şekil 2. İnce ayar işlemi için bir bölüm.

Bu çalışmada derin öğrenme modellerinin eğitimi ve doğrulaması için Keras kütüphanesi kullanılmıştır. Keras, TensorFlow çerçevesi içinde yüksek seviyeli bir API olarak çalışarak kullanıcı dostu ve esnek bir model oluşturma süreci sunmaktadır.

Modelin eğitim sürecinde kayıp fonksiyonu (loss function) olarak *categorical cross-entropy* tercih edilmiştir. Categorical cross-entropy, çok sınıflı sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılan bir kayıp fonksiyonudur ve modelin tahmin ettiği olasılıklar ile gerçek etiketler arasındaki farkı ölçerek modelin optimizasyonunu sağlar.Deneysel çalışmanın etkinliğini artırmak amacıyla kayıp fonksiyonu olarak "*categorical cross-entropy"* seçilmiştir. Keras' a ait olan dökümantasyonda etiketler ve tahminler arasındaki çapraz entropi kaybını hesaplayan kayıp fonksiyonudur.

Eğitim aşaması tamamlandıktan sonra modeller doğrulama setleri üzerinde test edilmiştir. Performans ölçümleri için beş metrik kullanılmıştır: Doğruluk, kesinlik, duyarlılık F1- Skoru, ROC-AUC Skoru. Bu metrikler, modellerin test verisi üzerindeki başarılarını ölçmek için kullanılmıştır.

Derin öğrenme modellerinin performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan metrikler arasında doğruluk (accuracy), hassasiyet (precision), duyarlılık (recall) ve F1 skoru gibi önemli ölçütler bulunmaktadır (Abunasser ve Al-Hiealy, 2022; Elshennawy ve Ibrahim, 2020). Bu metrikler, modelin sınıflandırma performansını farklı açılardan detaylı bir şekilde ölçmektedir (Vakili vd., 2020). Doğruluk (accuracy), modelin yapmış olduğu sınıflandırmalar içerisinden doğru olanların oranını belirtirken; hassasiyet (precision), modelin pozitif olarak sınıflandırdığı veri noktalarının içerisinden gerçekten pozitif olanların oranını göstermektedir (Chicco ve Jurman, 2020). Duyarlılık (recall) ise, gerçekten pozitif olan veri noktalarının ne kadarının doğru bir şekilde pozitif olarak sınıflandırıldığını ifade eder ve bu, modelin yeteneği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Wang vd., 2018). F1 skoru ise hassasiyet ve duyarlılık değerlerini bir bütün olarak birleştirerek modelin performansını daha kapsamlı ve dengeli bir şekilde değerlendirmekte, bu nedenle bu metrik, geliştiricilere modelin genel başarı durumu hakkında daha iyi bir anlayış sunmaktadır (Chicco ve Jurman, 2020; Sitaula ve Shahi, 2022). ROC-AUC, bir modelin doğru pozitif oranı (TPR - True Positive Rate) ve yanlış pozitif oranı (FPR - False Positive Rate) arasındaki ilişkiyi görselleştiren bir grafiktir (Gupta vd., 2021). Bu eğri, sınıflandırıcının karar eşiği değiştirildikçe nasıl performans gösterdiğini anlamak için kullanılır. Özellikle dengesiz veri kümelerinde, ROC-AUC metriği, Accuracy (Doğruluk) gibi yanıltıcı metriklerden daha iyi bir performans göstergesi olarak kullanılır (Wang vd., 2018). Eşitlik 1-5' de hesaplama ile ilgili gerekli ölçüm işlemleri verilmiştir. Burada belirtilen TP(True Positive); doğru şekilde pozitif tahmin edilen örnekler olarak, TN(True Negative); doğru şekilde negatif tahmin edilen örnekler olarak, FP(False Positive); yanlış şekilde pozitif tahmin edilen örnekler olarak, FN(False Nagtive); yanlış şekilde negatif tahmin edilen örnekler tanımlamak mümkündür.

$$Doğruluk = \frac{\mathrm{TP} + \mathrm{TN}}{\mathrm{TP} + \mathrm{TN} + \mathrm{FP} + \mathrm{FN}} \quad (1)$$

$$Kesinlik = \frac{\mathrm{TP}}{TP + FP} \quad (2)$$

$$Duyarlılık = \frac{\mathrm{TP}}{TP + FN} \quad (3)$$

$$F1 = 2 \text{ x } \frac{\text{Kesinlik x Duyarlılık}}{\text{Kesinlik+ Duyarlılık}} \quad (4)$$

$$X \text{ ekseni } (FPR) = \frac{\mathrm{FP}}{\mathrm{FP+ TN}} \; Y \text{ ekseni } (TPR) = \frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP+ FN}} \quad (5)$$

Tek başına en iyi performansı veren modeller belirlendikten sonra birleştirme teknikleri uygulanmıştır. Bu aşamada topluluk modelleri için yaygın olarak kullanılan yaklaşımlardan ağırlıklı ortalamalı karar (soft voting), çoğunluk kararı (hard voting) ve yeni bir model ile son kararın verilmesi (meta model) teknikleri uygulanmıştır. Bu yöntemler topluluk yöntemleri test edilmiştir. Tüm modellerin birleşimi ile oluşturulan model için lojistik regresyon meta model olarak kullanılmıştır. Bunun sebebi farklı derin öğrenme modellerinden elde edilen tahminleri birleştirerek nihai bir karar verebilmektir. Lojistik regresyonun seçilmesinin sebebi oldukça hafif ve hızlı bir sınıflandırma algoritması olmasıdır. Lojistik regresyon ile birlikte birden fazla modelin çıktıları alınarak, bu çıktıların üzerinden yeni bir tahmin yapılmaktadır. Bu durum modelin ağırlıklarını optimize ederek en iyi kararın verilmesini sağlamaktadır. Lojistik regresyon ile tüm modellerin tahminleri giriş olarak verilmiştir. Lojistik regresyon bu tahminleri kullanarak nihai bir tahminde bulunarak sonuç elde etmiştir. Tüm bunlar neticesinde lojistik regresyon, hangi

modelin hangi durumda daha iyi olduğunu öğrenerek, bu duruma göre de ağırlıklarını optimize etmiştir.

Ortalama tahmin yönteminde, tüm modellerin sınıf olasılıklarının ortalaması alınmakta ve en yüksek değere sahip olan sınıf seçilmektedir. Çoğunluk oylaması yönteminde her modelin tahmin ettiği sınıf alınarak en çok tahmin edilen sınıf seçilmektedir. Meta model ile temel modellerin çıktılarının bir ikinci model ile analiz edilmesini sağlamaktadır.

Seçilecek modeller belirlenirken CNN tabanlı mimariler tercih edilmiştir. ResNet152V2, DenseNet201, InceptionResNetV2, ConvNeXtBase ve Xception seçilen modellerdir. ResNet, He vd. (2016) tarafından önerilen ve derin sinir ağlarının eğitiminde karşılaşılan gradyan kaybolması problemini çözmeyi amaçlayan bir CNN mimarisidir. ResNet152V2, 152 katmana kadar çıkabilen derin bir modeldir. Derin ağlarda öğrenme sürecini kolaylaştıran residual bağlantılar içermektedir. Bu bağlantılar, önceki katmanların çıktısını doğrudan daha sonraki katmanlara ileterek geri yayılımı iyileştirmektedir. DenseNet, Huang vd. (2017) tarafından geliştirilen bir CNN mimarisidir. Bu modelin en önemli özelliği, her katmanın önceki tüm katmanlardan bilgi almasıdır. Böylece, geleneksel CNN'lerde olduğu gibi her katman sadece önceki katmandan değil, tüm önceki katmanlardan girdiyi alarak bilgi akışını güçlendirmekte ve parametre verimliliğini artırmaktadır. InceptionResNetV2, Szegedy vd. (2017) tarafından geliştirilen ve Inception mimarisi ile residual bağlantıları birleştiren bir CNN modelidir. Inception ağları, farklı boyutlarda filtreleri aynı anda çalıştırarak çoklu ölçekli özellikleri yakalarken, residual bağlantılar da derinlik arttıkça öğrenmeyi kolaylaştırmaktadır. Bu model, Google tarafından geliştirilen Inception ve ResNet mimarilerinin en iyi yönlerini birleştirerek daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşmayı başarmıştır. ConvNeXtBase, Liu vd. (2022) tarafından geliştirilen ve standart CNN mimarilerini Transformer tabanlı modellerle rekabet edecek şekilde optimize eden bir modeldir. ConvNeXtBase, Vision Transformer (ViT) gibi yeni nesil mimarilerin getirdiği yenilikleri geleneksel CNN'lere uygulayarak daha verimli ve ölçeklenebilir bir yapı sunmaktadır. Bu model, daha büyük kernel boyutları, normalizasyon iyileştirmeleri ve optimize edilmiş aktivasyon fonksiyonları ile geliştirilmiştir. Xception, Chollet (2017) tarafından geliştirilen ve Inception mimarisinin daha ileri bir versiyonu olan bir CNN modelidir. Xception'un temel özelliği, derin ayrık evrişimler kullanarak hesaplama maliyetini azaltırken modelin öğrenme kapasitesini artırmasıdır. Bu modelde, geleneksel konvolüsyon katmanları yerine, kanallar arasında bağımsız öğrenmeyi destekleyen ayrık evrişimler kullanılmaktadır. Böylece, daha az parametreyle daha iyi performans elde edilebilmektedir. Seçilen modeller, görüntü işleme, nesne algılama, tıbbi görüntü analizi ve diğer derin öğrenme uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Seçilen modeller kullanılan veri setine ve uygulama amacına bağlı olarak belirlenmiştir.

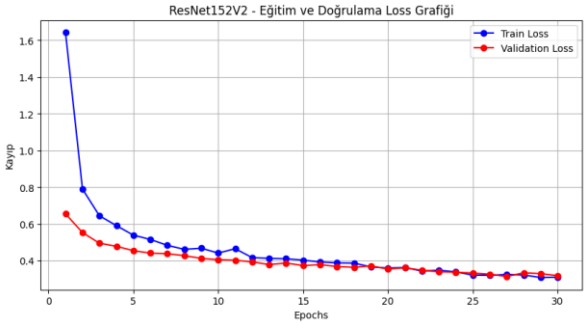
3. Bulgular ve Tartışma

Bu kısma kadar anlatılan çalışmanın detaylarının deneysel sonuçları bu bölümde anlatılmaktadır. Deneysel sonuçlar öncesinde veri setinin eğitim, doğrulama ve test setleri hazırlanmıştır. Modellerin eğitilmesi aşamasında yeterli olacağı ve tutarlı bir eğitim elde edilebilmesi amacıyla veri sayıları sabit kalmıştır. Bununla birlikte model seçimleri yapılmış ve hazırlanmış setler dengeli bir şekilde kaydedilmiştir. Çalışmada, öncelikle modellerin bireysel performansı analiz edilmiştir. ResNet152V2, DenseNet201, InceptionResNetV2, ConvNeXtBase ve Xception haricinde çalışma dahilinde birçok model test edilmiştir. Ancak değerlendirilen modeller içerisinde çalışma kapsamına uygun olarak sonuç üreten modeller dahil edilmiştir. Topluluk modeli içerisinde de uygun çalışması modellerin

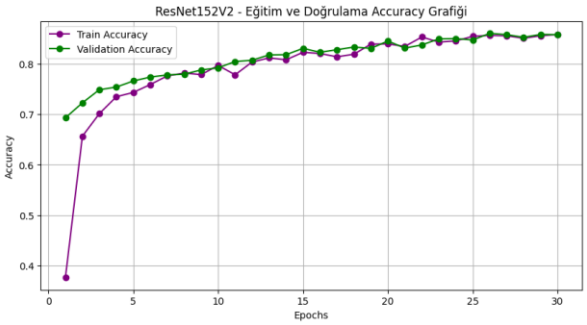
Seçiminde belirleyici bir faktör olmuştur. Modellerin metrik sonuçları Tablo 2’ de gösterilmiştir. Modellerin çıktıları incelendiğinde doğruluk değeri en yüksek olan modelin ResNet152V2 olduğu görülmektedir. Performans ölçümlerinde önemli bir metrik olan ROC-AUC değeri en yüksek sonuç veren modelin DenseNet201 modeli olduğu görülmektedir. Bu aşamada sistemde kullanılan modeller için eğitim ve doğruluk setleri için kayıp (loss) grafikleri ve doğruluk grafikleri hazırlanmıştır. ResNet152V2 modeli için kayıp grafiği Şekil 3’ de, doğruluk grafiği Şekil 4 ‘ de gösterilmiştir.

Tablo2. Modellerin metrik değerlerinin karşılaştırılması

Model	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1	ROC-AUC
ResNet152V2	0,8557	0,8693	0,8716	0,8687	0,9870
InceptionResNetV2	0,8100	0,8339	0,8304	0,8289	0,9802
DenseNet201	0,8525	0,8826	0,8747	0,8664	0,9884
Xception	0,7934	0,8096	0,8094	0,8030	0,9787
ConvNeXtBase	0,7113	0,7460	0,7205	0,7280	0,9603

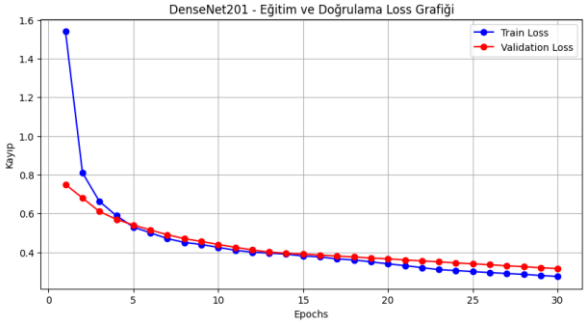


Şekil 3. ResNet152V2 eğitim ve doğrulama seti için kayıp grafiği.

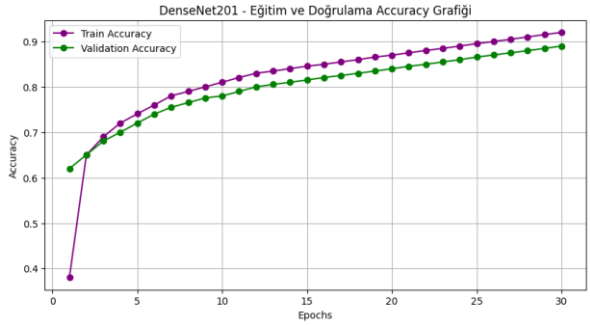


Şekil 4. ResNet152V2 eğitim ve doğrulama seti için doğruluk grafiği.

ResNet152V2 gibi önceden eğitilmiş bir modelin bazı katmanları dondurularak eğitime başlanmıştır. İlk olarak modelin sadece son sınıflandırma katmanlları eğitilmiş, daha sonra derin katmanlar açılarak modelin öğrenme kapasitesi artırılmıştır. Transfer öğrenme sayesinde model, ImageNet gibi bir veri setinde öğrendiği bilgileri koruyarak daha hızlı ve başarılı bir şekilde eğitilmiştir. İlk katmanların dondurulması, modelin ağız içi görüntülerine daha iyi adapte olmasını sağlamıştır. Eğitim sürecinin ilk aşamalarında kayıp değeri yüksekken, epoch ilerledikçe kayıp azalmış ve doğruluk artmıştır. Erken durdurma (early stopping) uygulanarak modelin aşırı öğrenmesi (overfitting) önlenmiştir.
DenseNet201 modeli için kayıp grafiği Şekil 5' de, doğruluk grafiği Şekil 6 ' da gösterilmiştir.

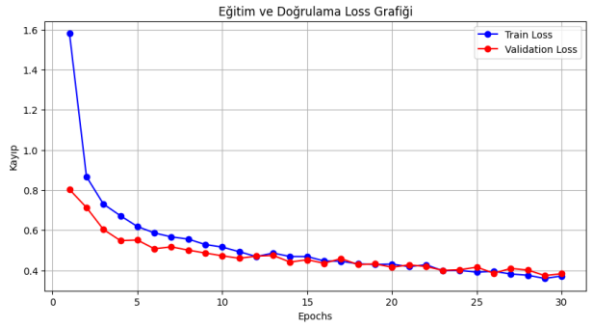


Şekil 5. DenseNet201 eğitim ve doğrulama seti için kayıp grafiği.

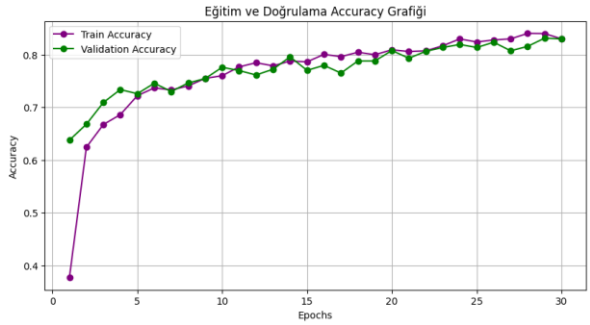


Şekil 6. DenseNet201 eğitim ve doğrulama seti için doğruluk grafiği.

DenseNet201 modeli, yoğun bağlantı yapısı nedeniyle daha hızlı öğrenme sağlamıştır. ResNet152V2 modeline kıyasla daha düşük başlangıç kaybı ile başlamıştır. Yoğun bağlantılar sayesinde erken öğrenme daha hızlı gerçekleşmiştir.
Xception modeli için kayıp grafiği Şekil 7' de, doğruluk grafiği Şekil 8 ' de gösterilmiştir.

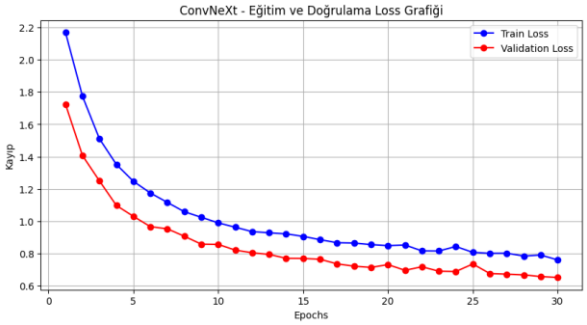


Şekil 7. Xception eğitim ve doğrulama seti için kayıp grafiği.

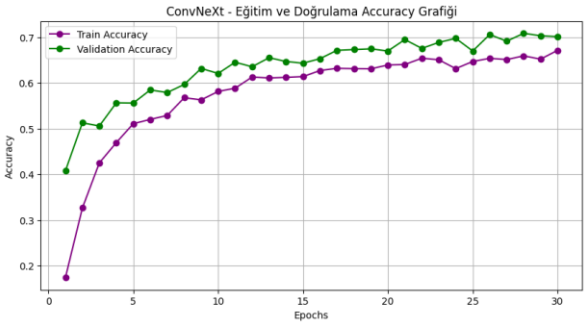


Şekil 8. Xception eğitim ve doğrulama seti için doğruluk grafiği.

Xception modeli, ayrık derin evrişimler (depthwise separable convolutions) kullanarak daha az parametre ile daha yüksek verimlilik sağlamaktadır. Eğitim sürecinde doğruluk değerleri diğer modellere göre daha düşük kalmıştır. Xception modeli veri setindeki detayları yakalamakta diğer modellere kıyasla daha zayıf performans göstermiştir. Xception modeli, daha hafif bir yapı sunduğu için hızlı çalışsa da, detaylı tıbbi görüntülerde bazı kayıplar yaşanmıştır. ConvNeXtBase modeli için kayıp grafiği Şekil 9' da, doğruluk grafiği Şekil 10' da gösterilmiştir.



Şekil 9. ConvNeXtBase eğitim ve doğrulama seti için kayıp grafiği.

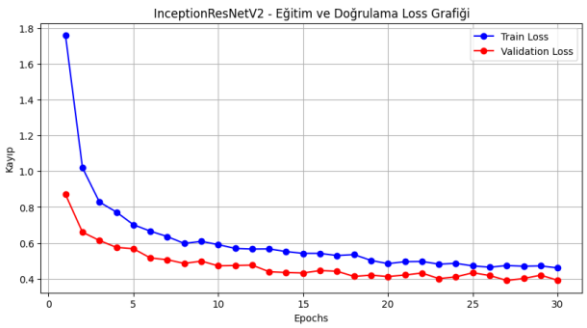


Şekil 10. ConvNeXtBase eğitim ve doğrulama seti için doğruluk grafiği.

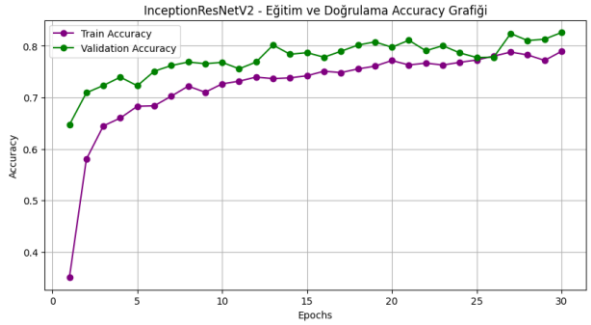
ConvNeXtBase modeli, Vision Transformer (ViT) tabanlı optimizasyonlar içeren modern bir CNN mimarisidir. Ancak, bu modelin doğruluk oranı beklenenden düşük çıkmıştır. Doğruluk eğrisi diğer modellere kıyasla daha dalgalı bir seyir izlemiştir. Veri setindeki kompleks morfolojik detayları yakalamakta zorlanmıştır.

InceptionResnetV2 modeli için kayıp grafiği Şekil 11' de, doğruluk grafiği Şekil 12' de gösterilmiştir. InceptionResNetV2 modelinin oğruluk eğrisi oldukça stabil ilerlemiştir. Diş morfolojisi gibi çok ölçekli (multi-scale) görüntülerde Inception mimarisi daha avantajlı bir sonuç verebilmesi mümkün olabilmektedir.

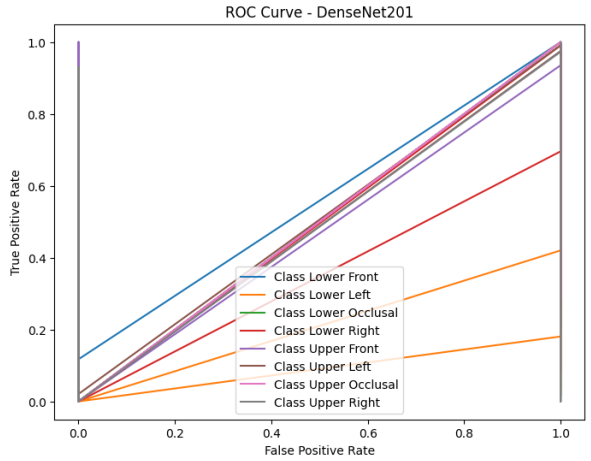
Tüm modellerin deneysel sonuçlarından bazı çıktıları için grafikleri belirtilmiştir. Bununla birlikte ROC-AUC değerleri de ölçülmüştür. En yüksek sonuç veren model olan DenseNet201 modelidir. Veri setinde belirtilen sekiz klasör için bu modelin ROC-AUC değerlerine ait grafik Şekil 13' de gösterilmiştir.



Şekil 11. InceptionResnetV2 eğitim ve doğrulama seti için kayıp grafiği.



Şekil 12. InceptionResnetV2 eğitim ve doğrulama seti için doğruluk grafiği.



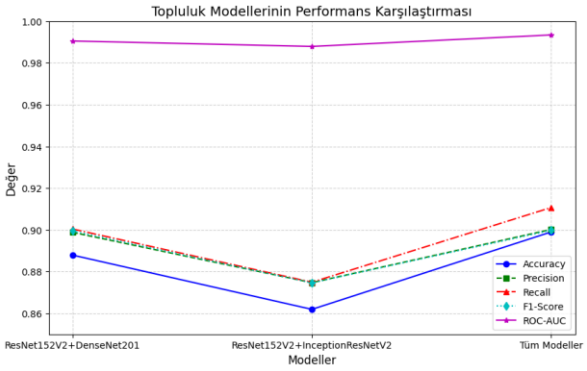
Şekil 13. DenseNet201 ROC eğrisi.

DenseNet201 modelinin ROC eğrisinin eğimi oldukça yüksektir, bu da modelin pozitif sınıfları ayırt etmede başarılı olduğunu gösterir. DenseNet201'in yüksek ROC-AUC değerine sahip olması, modelin duyarlılığının (recall) iyi olduğunu kanıtlamaktadır. Tıbbi uygulamalarda yanlış negatiflerin (false negatives) azaltılması büyük önem taşımaktadır. ROC-AUC değeri yüksek bir model, gerçek pozitifleri (true positives) yüksek doğrulukla tespit edebilmektedir.

Modellerin bireysel performans değerlendirmesinden sonra ikili modellerin eğitimine başlanmıştır. ROC -AUC değerlerinin en yüksek olduğu iki modelin ve ilk ve üçüncü modelin ikili olarak model eğitim sonuçlarının metrik değerlerine ait çıktılar Tablo 3' de verilmiştir. İkili oluşturulan modellerde ROC-AUC değerinin arttığı büyük farklılıklar görülmemektedir. Bunun sebebi modellerin bireysel olarak gösterdikleri performanslarının da oldukça iyi sonuçlar olabileceği düşünülmektedir. Çalışmada kullanılmak üzere seçilen beş modelin hepsinin topluluk modeli oluşturması ve veri seti üzerinde deneysel sonuçları gerçekleştirilmiştir. Lojistik regresyonun meta model olarak kullanılması neticesinde doğru ağırlıkların seçilmesi ile model en iyi sonuçlara ulaşmıştır. Seçilen tüm modellerin birlikte eğitilmesi sonucunda oluşan çıktılar için oluşturulan tüm veri sonuçları Tablo 3' de gösterilmiştir.

Tablo3. Modellerin metrik değerlerinin karşılaştırılması

Model	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1	ROC-AUC
ResNet152V2+DenseNet201	0,8879	0,8988	0,9004	0,8995	0,9905
ResNet152V2+InceptionResNetV2	0,8619	0,8747	0,8749	0,8746	0,9879
Tüm Modeller	0,8990	0,9002	0,9107	0,8998	0,9934



Şekil 5. Topluluk modellerin karşılaştırması.

Elde edilen sonuçlar, ağız içi görüntülerin sınıflandırılmasında derin öğrenme yöntemlerinin önemini ve etkinliğini ortaya koymaktadır. Tek başına en iyi performansı veren modellerin ResNet152V2 ve DenseNet201 olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, topluluk modeli yaklaşımı ile bu modellerin birleştirilmesi, daha iyi genelleme sağlanarak sınıflandırma başarısını artırmıştır. Bu durum, ağız içi görüntü analizinde tek bir model yerine çoklu model yaklaşımlarının kullanılmasının avantajlarını göstermektedir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde, bazı modellerin belirli sınıflarda daha yüksek doğruluk sergilediği ancak diğer sınıflarda daha düşük performans gösterdiği görülmüştür. Özellikle ConvNeXtBase modeli, diğer modellere kıyasla daha düşük doğruluk oranlarına sahip olmuştur. Bu durum, modelin mimarisinin diş görüntülerindeki karmaşık morfolojik farklılıkları tanımlamakta yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Öte yandan, ResNet152V2 ve DenseNet201 gibi daha derin yapılı ağlar, karmaşık desenleri ve ince detayları daha iyi yakalayabilmiştir.

Topluluk modelinin başarısının en önemli nedenlerinden biri meta öğrenme (meta model) ile ağırlıkların optimize edilmesi ve farklı modellerin güçlü yönlerinden faydalanılmasıdır. Lojistik regresyon meta model olarak kullanılarak, her modelin belirli sınıflarda gösterdiği başarı oranları değerlendirilmiş ve en iyi sonucu veren modelin daha fazla ağırlıklandırılması sağlanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, tekil modellerde görülen genelleme eksiklikleri giderilmiş ve hata oranları minimize edilmiştir.

4. Sonuç

Bu çalışma, ağız içi görüntülerini kullanarak diş bölgesinin sınıflandırılmasına yönelik derin öğrenme tabanlı yaklaşımları incelemiş ve çeşitli model kombinasyonlarının performanslarını değerlendirmiştir. Yapılan deneylerde ResNet152V2, DenseNet201, InceptionResNetV2, ConvNeXtBase ve Xception modelleri tek tek ve topluluk modeli şeklinde test edilmiştir. Sonuçlar, topluluk modellerinin bireysel modellere kıyasla daha yüksek doğruluk ve genelleme kabiliyetine sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle, ResNet152V2 + DenseNet201 modeli ile elde edilen %89,9 doğruluk oranı ve 0,9934 ROC-AUC değeri, ağız içi görüntülerinin sınıflandırılmasında oldukça başarılı bir performans sergilemiştir.

Çalışmanın önemli bulgularından biri, derin öğrenme tabanlı yaklaşımların diş hekimliği alanındaki tanı süreçlerini hızlandırmada ve doğruluk oranını artırmada büyük potansiyel taşıdığıdır. Bu yöntemler, klinik ortamda daha hızlı ve güvenilir teşhisler sunarak diş hekimlerine destek olma kapasitesine sahiptir. Ayrıca, geliştirilmiş sınıflandırma modelleri, uzaktan hasta değerlendirme süreçlerinde de kullanılabilir ve dijital diş hekimliği uygulamalarına entegre edilebilir.

Pratik Kullanım Alanları:

-Otomatik Teşhis ve Tedavi Planlama: Derin öğrenme tabanlı modeller, diş hekimleri tarafından ön teşhis amacıyla kullanılabilir. Örneğin, çürüklerin veya diş eti hastalıklarının erken tespiti sağlanabilir.

-Uzaktan Hasta Takibi: Dijital platformlar aracılığıyla hastaların ağız içi görüntüleri analiz edilebilir ve ön değerlendirme yapılabilir.

-Ortodontik ve Adli Bilimler Uygulamaları: Diş morfolojisine dayalı sınıflandırma, kimlik tespiti, yüz tanıma ve ortodontik planlamada kullanılabilir.

Çalışmanın Kısıtlılıkları ve Gelecek Çalışmalar:

-Veri seti yalnızca belirli bir yaş grubuna (1-14 yaş) ait olup, yetişkin bireyleri içermemektedir. Gelecekteki çalışmalar, farklı yaş gruplarını ve daha geniş popülasyonları içeren veri setleriyle genişletilmelidir.

-Kullanılan derin öğrenme modelleri daha fazla veri artırma (data augmentation) teknikleri ile desteklenebilir, böylece modelin genelleme yeteneği artırılabilir.

-Gerçek klinik ortamlarda test edilerek modellerin pratik kullanım açısından değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, ağız içi görüntülerinin analizinde derin öğrenme tekniklerinin etkinliğini göstermekte ve diş hekimliği alanında dijital teşhis ve tedavi yöntemlerine katkı sağlayabilecek önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Devam eden araştırmalar, bu sistemlerin gerçek klinik ortamlarda daha geniş ölçekte uygulanabilirliğini test etmeyi amaçlamaktadır. Gelecekte, ağız sağlığı teşhislerinin otomatikleştirilmesi ve yapay zekâ destekli sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, hem klinik hem de uzaktan sağlık hizmetleri önemli ölçüde iyileşebileceği öngörülmektedir. Yapay zekâ tabanlı modellerin daha fazla geliştirilmesiyle, diş

hekimliği alanında teşhis ve tedavi süreçlerinin daha da ileriye taşınması beklenmektedir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	S.Ç.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

Abunasser BS, Al-Hiealy MRJ. 2022. Prediction of instructor performance using machine and deep learning techniques. Semant Scholar, 21(2): 1-12.

Alalharith D, Alharthi H, Alghamdi W, Alsenbel Y, Aslam N, Khan I, Barouch K. 2020. A deep learning-based approach for the detection of early signs of gingivitis in orthodontic patients using faster region-based convolutional neural networks. Int J Environ Res Public Health, 17(22): 8447.

Al-Khannaq M, Nahidh M, Al-Dulaimy D. 2022. The importance of the maxillary and mandibular incisors in predicting the canines and premolars crown widths. Int J Dent, 2022: 1-6.

Chaudhary S, Shah P, Paygude P, Chiwhane S, Mahajan P, Chavan P, Kasar M. 2024. Varying views of maxillary and mandibular aspects of teeth: A dataset. Data Brief, 56: 110772.

Chicco D, Jurman G. 2020. The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. BMC Genomics, 21(1): 1-13.

Chollet F. 2017. Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. Proc IEEE Conf Comput Vis Pattern Recognit (CVPR), Honolulu, HI, USA, pp: 1251-1258.

Corns S, Liversidge H, Fleming P. 2021. An assessment of root stage of canine and premolar teeth at alveolar eruption. J Orthod, 49(2): 122-128.

Elshennawy NM, Ibrahim DM. 2020. Deep-pneumonia framework using deep learning models based on chest X-ray images. Diagnostics (Basel), 10(9): 649.

García-Gil M, Alarcón J, Cacho A, Yáñez-Vico R, Palma-Fernández J, Martín C. 2023. Association between eruption sequence of posterior teeth, dental crowding, arch dimensions, incisor inclination, and skeletal growth pattern. Children (Basel), 10(4): 674.

Gupta A, Gupta S, Katarya R. 2021. InstaCovNet-19: A deep learning classification model for the detection of COVID-19 patients using chest X-ray. Appl Soft Comput, 101: 107064.

He K, Zhang X, Ren S, Sun J. 2016. Identity mappings in deep residual networks. Proc Eur Conf Comput Vis (ECCV), Amsterdam, Netherlands, pp: 123-135.

Huang G, Liu Z, Van Der Maaten L, Weinberger KQ. 2017. Densely connected convolutional networks. Proc IEEE Conf Comput Vis Pattern Recognit (CVPR), Honolulu, HI, USA, pp: 4700-4708.

Kanter R, Battistuzzi P, Truin G. 2018. Temporomandibular disorders: "Occlusion" matters! Pain Res Manag, 2018: 1-13.

Khalaf K, Brook A, Smith R. 2022. Genetic, epigenetic and environmental factors influence the phenotype of tooth number, size and shape: Anterior maxillary supernumeraries and the morphology of mandibular incisors. Genes (Basel), 13(12): 2232.

Khanagar S, Al-Ehaideb A, Maganur P, Vishwanathaiah S, Patil S, Baeshen H, Bhandi S. 2021. Developments, application, and performance of artificial intelligence in dentistry – a systematic review. J Dent Sci, 16(1): 508-522.

Kühnisch J, Meyer O, Hesenius M, Hickel R, Gruhn V. 2021. Caries detection on intraoral images using artificial intelligence. J Dent Res, 101(2): 158-165.

Liu Z, Lin Y, Cao Y, Hu H, Wei Y, Zhang Z, Lin S, Guo B. 2022. A ConvNet for the 2020s. Proc IEEE/CVF Conf Comput Vis Pattern Recognit (CVPR), New Orleans, LA, USA, pp: 11976-11986.

Palkit T, Aggarwal I, Malhotra Y, Uppal M, Goyal M, Singh N. 2020. The relationship between maxillary and mandibular base lengths and dental crowding in patients with true class II malocclusions. Int Healthc Res J, 4(7): OR5-OR9.

Rithanya M. 2023. Prevalence of dental caries in permanent second molars in teenagers using ICDAS. J Pharm Res Int, 35(35): 28-35.

Sitaula C, Shahi TB. 2022. Monkeypox virus detection using pre-trained deep learning-based approaches. J Med Syst, 46(1): 1-9.

Soundarya N, Jain V, Shetty S, Akshatha B. 2021. Sexual dimorphism using permanent maxillary and mandibular incisors, canines, and molars. J Oral Maxillofac Pathol, 25(1): 183-188.

Szegedy C, Ioffe S, Vanhoucke V, Alemi A. 2017. Inception-v4, Inception-ResNet and the impact of residual connections on learning. Proc AAAI Conf Artif Intell, San Francisco, USA, pp: 4278-4284.

Tan R, Zhu X, Chen S, Zhang J, Liu Z, Li Z, Yang L. 2024. Caries lesions diagnosis with deep convolutional neural network in intraoral qlf images by handheld device. BMC Oral Health, 24(1): 1-5.

Ueno K, Kumabe S, Nakatsuka M, Tamura I. 2019. Factors influencing dental arch form. Okajimas Folia Anat Jpn, 96(1): 31-46.

Vakili M, Ghamsari M, Rezaei M. 2020. Performance analysis and comparison of machine and deep learning algorithms for IoT data classification. arXiv Preprint, arXiv: 2001.09636.

Wang S, Shen Y, Fuh L, Peng S, Tsai M, Huang H, Hsu J. 2020. Relationship between cortical bone thickness and cancellous bone density at dental implant sites in the jawbone. Diagnostics (Basel), 10(9): 710.

Wang Z, Hu M, Zhai G. 2018. Application of deep learning architectures for accurate and rapid detection of internal mechanical damage of blueberry using hyperspectral

transmittance data. Sensors (Basel), 18(4): 1126.

Wimalarathna A, Thilakumara I, Jayasinghe V, Amaratunga P, Jayasinghe R. 2021. Location of vital structures and available bone for the placement of dental implants in clinically edentulous patients: A cohort study. J Dent Implant Res, 40(4): 151-157.

Yotsuya M, Nakano M, Umehara K, Nomura T, Sato T. 2020. Implant and prosthetic treatment in esthetic zone with alveolar ridge preservation and autotransplantation: Clinical case report with 16-year follow-up. Bull Tokyo Dent Coll, 61(2): 145-150.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1640219

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 715-728 / May 2025

IN SILICO EXPLORATION OF PLANT EXTRACTS AS ACHE INHIBITORS: INSIGHTS FROM MOLECULAR DYNAMICS AND MM/GBSA ANALYSIS FOR ALZHEIMER'S DRUG DEVELOPMENT

Barış KURT[1]*, Murat EVCİL[2], Ayşe BARAN[3]

[1]*Muş Alparslan University Faculty of Arts and Sciences, Department of Chemistry, 49000, Muş, Türkiye*
[2]*Dicle University Institute of Science and Technology, Department of Chemistry, 21280, Diyarbakir, Türkiye*
[3]*Mardin Artuklu University Graduate Education Institute, Department of Biology, 47200, Mardin, Türkiye*

Abstract: Alzheimer's disease is a long-term neurological disorder that affects memory and other cognitive abilities. Physostigmine is a drug still used in treating symptoms associated with this disease, with its primary mechanism of action being AChE inhibition. AChE plays a crucial role in cholinergic neurotransmission, and its inhibition has been linked to the improvement of symptoms in Alzheimer's disease. In this study, 34 phytochemicals detected through LC-MS/MS analysis of 13 plant species were investigated as potential alternative drug candidates to physostigmine. For this purpose, docking studies followed by molecular dynamics simulations and MM/GBSA energy calculations were performed. The results revealed that 24 out of 34 phytochemicals were either very close to physostigmine (MM/GBSA binding affinity: -26.102 kcal/mol) or better AChE inhibitors. Additionally, it was determined that physostigmine increased the flexibility of the molecule when bound to the AChE enzyme, a unique result compared to our drug candidates. Our research emphasizes the potential of plant-derived compounds as AChE inhibitors and presents promising candidates for future drug development studies. Furthermore, physostigmine's property of increasing enzyme flexibility offers a new perspective in drug design and indicates that the role of this feature in therapeutic efficacy needs to be examined in more detail.
Anahtar kellmeler: Medicinal plants, MM/GBSA, In silico, Drug development

Keywords: Medicinal plants, MM/GBSA, In silico, Drug development

***Corresponding author:** Muş Alparslan University Faculty of Arts and Sciences, Department of Chemistry, 49000, Muş, Türkiye
E mail: b.kurt@alparslan.edu.tr (B. KURT)
Barış KURT https://orcid.org/0000-0002-1406-0915
Murat EVCİL https://orcid.org/0000-0002-4646-8042
Ayşe BARAN https://orcid.org/0000-0002-2317-0489

Received: February 14, 2025
Accepted: March 21, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Kurt B, Evcil M, Baran A. 2025. In silico exploration of plant extracts as AChE Inhibitors: İnsights from molecular dynamics and MM/GBSA analysis for Alzheimer's drug development BSJ Eng ScI, 8(3): 715-728.

1. Introduction

Acetylcholinesterase (AChE) plays a pivotal role in the cholinergic system of the central nervous system by terminating acetylcholine-mediated neurotransmission. Inhibition of AChE has been a target in treating neurodegenerative diseases due to its involvement in the pathogenesis of conditions such as Alzheimer's disease (AD) (Dorronsoro et al., 2003). Zimmerman & Soreq, (2006). AChE inhibitors are used to increase the concentration of acetylcholine in the synaptic cleft, enhancing cholinergic transmission and mitigating symptoms of AD. Notably, research highlights the multifaceted nature of neurodegenerative diseases, emphasizing the necessity for drugs that target various aspects of these conditions simultaneously (Kabir et al., 2019). Lustoza Rodrigues et al. (2023). The development of AChE inhibitors, including tacrine-based compounds, has shown promise in addressing the complex, multifactorial nature of AD, underscoring the ongoing need for innovative treatments that can slow disease progression and improve the quality of life for affected individuals (Bortolami et al., 2021).

In addition to Alzheimer's disease, AChE inhibitors play a critical role in the treatment of various other medical conditions, highlighting their broad therapeutic potential. For instance, Myasthenia Gravis (MG), a chronic autoimmune neuromuscular disorder characterized by weakness and rapid fatigue of the voluntary muscles, benefits from AChE inhibitors. These inhibitors are used to increase neuromuscular transmission and improve muscle strength by preventing the breakdown of acetylcholine at the neuromuscular junction, offering symptomatic relief to patients with MG (Punga & Stålberg, 2009). Mantegazza et al. (2020). Beyond neurological disorders, the modulation of AChE activity by certain glucans suggests a therapeutic pathway for diseases where the cholinergic system plays a part in the pathophysiology (Reale & Costantini, 2021). Benfante et al, (2021). However, the application of AChE inhibitors extends beyond these specific conditions, as ongoing research continues to uncover their utility in treating a spectrum of diseases where cholinergic dysfunction is implicated. This expanding role of AChE inhibitors underscores the importance of these compounds in

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

modern pharmacotherapy, offering hope for more effective treatments for a range of disorders beyond their traditional applications (Mukherjee et al., 2007). Walczak-Nowicka & Herbet (2021).

The search for new AChE inhibitors has led to a focus on plant-derived compounds, which offer a diverse range of potential therapeutic benefits (Howes et al., 2003). Huang et al. (2013). Murray et al. (2013). Ranjan & Kumari (2017). Alkaloids and certain meroterpenoids from fungi have shown strong AChE inhibitory activity, suggesting their potential in treating neurodegenerative disorders (Huang et al., 2013). Plant-derived compounds, including alkaloids, coumarins, flavonoids, and stilbenes, have also been identified as promising AChE inhibitors (Murray et al., 2013). These compounds have the potential to address the cholinergic deficit in Alzheimer's disease and other neurodegenerative disorders (Ranjan & Kumari, 2017). The exploration of these natural compounds not only contributes to our understanding of their biological activities but also supports the development of new therapeutic agents (Howes et al., 2003). Mukherjee et al., (2007).

Physostigmine is a drug used in the treatment of Alzheimer's disease and known as a cholinesterase inhibitor (Hampel et al., 2018). Although physostigmine does not permanently cure Alzheimer's disease, it is known to alleviate symptoms and slow the progression of the disease (Jenike et al., 1990). Coelho & Birks, (2001). There are studies on the positive effects of this drug on memory loss, which is one of the most important symptoms of the disease (Thal et al., 1983). Therefore, comparing a potential drug candidate with physostigmine will give an idea about the effectiveness of the drug.

This study aimed to discover new AChE inhibitors that could be used in the treatment of Alzheimer's disease. For this purpose, docking studies supported by molecular dynamics simulation and MM/GBSA analyses were conducted to determine the AChE enzyme inhibition potential of molecules derived from selected plant extracts. It was shown that molecules such as Epigallocatechin, Hesperidin, and Rutin could effectively inhibit this enzyme by binding to AChE with high binding affinity, and the potential of drug candidates was compared with physostigmine, which is used as an Alzheimer's drug in the market. The results reveal that the candidate molecules are very strong cholinesterase inhibitors and also show that the drug called physostigmine, which exhibits weaker binding activity compared to our candidate molecules, contributes to the flexibility of the protein during molecular dynamics simulation.

The results of this research represent an important step in the drug development process for the treatment of Alzheimer's disease. Detailed examination of the interactions between selected molecules and AChE will provide a better understanding of their potential effects on the disease mechanism. Moreover, our study is important in showing that plant-derived molecules can be considered as new drug candidates for the treatment of Alzheimer's disease. While all 34 different chemical compounds obtained from plant extracts had docking scores of -5.7 or lower, MM/GBSA calculations performed for 24 molecules showing better binding scores than -7.0 kcal showed that all molecules are potential drug candidates. Therefore, the effectiveness of plant-based drugs in Alzheimer's treatment has been theoretically proven through this study. In light of these findings, it is of great importance to evaluate these molecules not only for Alzheimer's disease but also for myasthenia gravis or glucan-related disorders targeting AChE inhibition in future studies. Further investigation of these candidate molecules through preclinical and clinical studies may contribute to the development of new and effective approaches for the treatment of these diseases.

2. Materials and Methods

2.1. Material

Between March and October 2023, parts of certain plants (leaves, flowers, seeds, and above-ground parts) were commercially purchased from various local markets, and their extracts were obtained. Their chemical compositions and contents were then analyzed using LC-MS/MS (Table 1).

2.2 Extraction process and determination of chemical compositions

The 15-gram powdered plant samples were taken in a glass flask and extracted in a magnetic stirrer with 300 ml of methanol at a constant stirring rate of 250 rpm. This process was repeated three times.

The obtained extracts underwent the evaporation process after having undergone the filtrating (Watman No. 1 filter) process and the crude extracts were obtained. 1 mg/mL of crude extracts were dissolved in methanol for LC-MS/MS analysis. Before LC-ESI/MS analysis, the solution was transferred to a vial and filtered using a 0.22 mm filter. For chromatographic separation, a Poroshell 120 EC-C18 column (100 mm, 4.6 mm I.D., 2.7 mm) was used. The filtered plant mixture was moved down the column by a carrier phase made of 0.1% formic acid and a mobile phase made of 5 mM ammonium formate. Mobile phase B was also used, which was made up of 0.1% formic acid in methanol and 5 mM ammonium formate (Baran et al., 2023).

Table 1. Details of plant species used

Species	Used Parts	Locality
Mentha longifolia (L.) HUDSON	Leaf	Mardin/Local Market
Celtis tournefortii LAM.	Leaf	Mardin/Local Market
Elaeagnus angustifolia L.	Flower and Leaf	Mardin/Midyat Local Market
Morus rubra L.	Leaf	Diyarbakir/Local Market
Pistacia eurycarpa L.	Leaf	Mardin/Local Market
Thymus fallax	Leaf	Mardin/Local Market
Gundelia tournefortii L.	Above ground parts	Diyarbakir/Local Market
Foeniculum vulgare MILLER	Seed	Diyarbakir/Local Market
Cucurbita moschata L.	Leaf	Diyarbakir/Local Market

2.3. Selecting potential Drug Candidate Molecules:

Among potential treatment approaches for Alzheimer's disease, the inhibition of AChE enzyme emerges as a significant strategy. In this context, molecules derived from natural sources attract attention as innovative drug candidates. Our research aims to discover new AChE inhibitors that could be used in the treatment of Alzheimer's disease. To achieve this, we first concentrated on extracts from a variety of botanical sources, such as the following: Mentha longifolia, Celtis tournefortii, Elaeagnus angustifolia, Morus rubra, Pistacia eurycarpa, Thymus fallax, Gundelia tournefortii, Foeniculum vulgare and Cucurbita moschata. These plants may have AChE inhibitory action and are commonly used in folk medicine to treat a variety of illnesses.

The first phase of our research involved a comprehensive biochemical analysis of the selected botanical extracts, utilizing Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) technology. This analysis enabled the detailed identification of active compounds within the extracts. The results revealed that each botanical extract contains rich and diverse molecular structures. The data obtained have been summarized in Table 2, listing each botanical extract and the identified active molecules in detail. All molecules selected for further study are based on these lists and are compounds naturally found in plants. The selected molecules were then subjected to a two-stage testing process. The first stage involved molecular docking in a computational environment. This method was used to assess the potential interaction mechanisms and binding affinities of the molecules with the AChE enzyme. The docking results demonstrated the interaction potentials and inhibition strengths of the molecules with AChE.

The second stage was molecular dynamics (MD) analysis, conducted to examine the stability and dynamic behavior of the molecule-enzyme complexes over time. Based on the docking results, the MD analysis allowed us to evaluate how effective and stable the selected molecules are in a biological environment. This two-pronged approach has guided us in identifying potential AChE inhibitors that could be used in the treatment of Alzheimer's disease. As a result of our research, a list of promising molecules derived from specific plant extracts and exhibiting potential for AChE inhibition has been compiled. These molecules stand out as strong candidates for future preclinical and clinical studies.

2.4. Docking Analysis:

Docking analysis was conducted to theoretically elucidate the biological activity. For this purpose, Autodock Vina (Eberhardt et al., 2021) along with MGL TOOLS 1.5.6 (Morris et al., 2009) were utilized. The 3D mol files of the ligands were downloaded from the ChemSpider (Pence and Williams, 2010) and The Cambridge Structural Database (Groom et al., 2016), followed by optimization. The AChE protein was sourced from the RCSB Protein Data Bank (rcsb.org) (Berman, 2000) with PDB ID: 6O4W. Due to the size of the protein being larger than the maximum size of the Autodock Tools gridbox, the protein was divided into chains A and B using the Chimera (Pettersen et al., 2004) software, and the ligands and water molecules within each chain were removed. With Autodock Tools (Morris et al., 2009), polar hydrogens and Kollman charges were added separately to each chain of the protein, a grid box was generated, and the chains were saved as pdbqt files with charges. Subsequently, the ligands were converted to pdbqt files using the prepare_ligands4.py program and a written shell script, and Gasteiger charges were added.

Docking procedures were then initiated with vina. exe. Each ligand underwent separate docking processes with both the A and B chains. Upon completion of the docking process, the lowest score from each docking event for both chains A and B was taken as the basis, and the receptor-ligand interaction was visualized and analyzed in the Discovery Studio Visualizer (BIOVIA, 2019) program.

Table 2. Chemical profile data of used plants and docking score capacities

	Detected Components	Docking Score (kcal/mol)
Mentha longifolia (Leaf)	Protocatechuic acid	-6.50
	Chlorogenic acid	-10.0
	Hydroxybenzaldeyde	-5.80
	Caffeic Acid	-7.50
	p-coumaric acid	-7.20
	Salicylic Acid	-6.50
	Resveratrol	-9.20
	Trans-ferulic acid	-7.30
	Scutellarin	-9.90
	Rutin	-11.4
	Naringenin	-8.40
Celtis tournefortii (Leaf)	Detected Components	
	Caffeic Acid	-7.50
	Vanillin	-6.00
	p-coumaric acid	-7.20
	Isoquercitrin	-8.50
	Quercetin	-9.50
Elaeagnus angustifolia (Fruit)	Detected Components	
	Gallic acid	-6.50
	Protocatechuic acid	-6.50
	Hydroxybenzaldeyde	-5.80
	p-coumaric acid	-7.20
Elaeagnus angustifolia (Flower)	Detected Components	
	p-coumaric acid	-7.20
	Trans-ferulic acid	-7.30
	Sinapic acid	-7.10
	Isoquercitrin	-8.50
	Kaempferol-3-glucoside	-8.20
	Fisetin	-8.90
	Trans-cinnamic acid	-7.10
	Naringenin	-8.40
Elaeagnus angustifolia (Leaf)	Detected Components	
	Vanillin	-6.00
	p-coumaric acid	-7.20
	Trans-ferulic acid	-7.30
	Rutin	-11.4
	Kaempferol-3-glucoside	-8.20
	Fisetin	-8.90
Morus rubra (Leaf)	Detected Components	
	Gallic acid	-6.50
	Protocatechuic acid	-6.50
	Chlorogenic acid	-10.0
	Hydroxybenzaldeyde	-5.80
	p-coumaric acid	-7.20
	Hesperidin	-10.8
	Isoquercitrin	-8.50

Table 2. Chemical profile data of used plants and docking score capacities (continued)

	Detected Components	Docking Score (kcal/mol)
	Shikimic acid	-6.10
	Gallic acid	-6.50
	Protocatechuic acid	-6.50
	Epigallocatechin	-7.40
	Catechin	-9.20
	Caffeic Acid	-7.50
	Vanillin	-6.00
Pistacia eurycarpa (Leaf)	*p*-coumaric acid	-7.20
	Salicylic Acid	-6.50
	Protocatehuic ethyl ester	-6.50
	Hesperidin	-10.8
	Isoquercitrin	-8.50
	Kaempferol-3-glucoside	-8.20
	Trans-cinnamic acid	-7.10
	Quercetin	-9.50
	Naringenin	-8.40
	Detected Components	
	Gallic acid	-6.50
	Chlorogenic acid	-10.0
	Hydroxybenzaldeyde	-5.80
	Caffeic Acid	-7.50
	Syringic acid	-6.50
	Vanillin	-6.00
Thymus fallax (Leaf)	*p*-coumaric acid	-7.20
	Taxifolin	-8.80
	Trans-ferulic acid	-7.30
	Scutellarin	-9.90
	Trans-cinnamic acid	-7.10
	Quercetin	-9.50
	Naringenin	-8.40
	Biochanin A	-9.80
	Detected Components	
	Protocatechuic acid	-6.50
Gundelia tournefortii (Leaf)	*p*-coumaric acid	-7.20
	Coumarin	-7.30
	Trans-cinnamic acid	-7.10
	Detected Components	
	Protocatechuic acid	-6.50
	Chlorogenic acid	-10.0
	Hydroxybenzaldeyde	-5.80
	Vanillic acid	-6.40
Foeniculum vulgare (Seed)	Caffeic Acid	-7.50
	Vanillin	-6.00
	p-coumaric acid	-7.20
	Trans-ferulic acid	-7.30
	Isoquercitrin	-8.50
	Kaempferol-3-glucoside	-8.20
	Detected Components	
	Protocatechuic acid	-6.50
Cucurbita moschata (Leaf)	Hydroxybenzaldeyde	-5.80
	Caffeine	-5.70
	p-coumaric acid	-7.20

2.5. Molecular Dynamics Simulation and MM/GBSA Calculations:

Following the completion of the docking process with Autodock, where 24 ligands exhibited binding energies superior to -7.0 kcal/mol, molecular dynamics simulations were initiated. The preparation of simulation files was conducted using the tleap program within the Amber22 suite, employing ff19SB force fields for the protein and gaff2 for the ligands. The simulation environment was constituted by an OPCBOX water box with a 10 Å edge length, incorporating OPC water molecules. The OpenMM 7 software (Eastman et al., 2017) facilitated the execution of the molecular dynamics simulation process, utilizing Nvidia Tesla A100 80 GB GPUs leased from Google Cloud for computational resources.

To expedite the simulation process, following the generation of topology and coordinate files, a "hydrogen mass repartitioning" procedure was implemented using the parmed program with the hmassrepartition command in parmed program (Hopkins et al., 2015). Case et al. (2023). Subsequently, a two-phase minimization protocol was initiated. In the initial phase, the complex was constrained with a force constant of 500 kcal/mol·Å^2, while water molecules were minimized over 1000 steps using the Particle Mesh Ewald (PME) method with a 10Å cutoff. The second phase involved removing the force constant from the complex and minimizing the entire system using the same method, but with an increased cutoff of 12Å.

The heating process was then initiated employing the Langevin thermostat and the SHAKE algorithm, maintaining a 12Å cutoff. The temperature was gradually increased to 298K in 1-degree increments. Upon reaching 298K, molecular dynamics simulation was conducted under 1 atm pressure, with a 4 ps relaxation time, utilizing the same thermostat and algorithm.

For rapid calculation of MM/GBSA energies during the preliminary trial, a 2 ns test was performed. Subsequently, the simulation was extended to 20 ns for molecules Hesperidin, Rutin, Chlorogenic acid, and Epigallocatechin, which exhibited the highest binding energies to Chain A, along with the Physostigmine molecule. As elaborated below, upon confirming the stability of RMSD values, it was determined that the simulation duration was sufficient, and the process was terminated.

This methodological approach ensures a comprehensive exploration of the system's conformational space while maintaining computational efficiency. The use of hydrogen mass repartitioning and the two-step minimization process allows for a more stable simulation environment. The gradual heating and equilibration phases, followed by the production run, provide a robust framework for analyzing the molecular interactions and dynamics of the studied compounds. The extension of the simulation to 20 ns for selected molecules offers valuable insights into their long-term behavior and binding characteristics, particularly in comparison to the known inhibitor, physostigmine. The stability of RMSD values serves as a critical indicator of simulation convergence, validating the adequacy of the chosen simulation duration for capturing relevant molecular events.

Additionally, the simulation phases were documented by generating output files in NetCDF format and saving checkpoint files at specified intervals. Upon the conclusion of the simulations, the ante-MMPBSA method was employed to generate prmtop files for the complex, ligand, and receptor, facilitating the computation of the binding energies of ligands to the receptor through MM/GBSA calculations. This process enabled a comprehensive analysis of the results from the molecular dynamics simulations and provided an assessment of the thermodynamic stability of the structures obtained during the simulation.

3. Result and Discussion

3.1. Docking Scores:

The results from the docking analysis are presented in Table 3. Among the evaluated molecules, Rutin, Hesperidin, Luteolin, and Chlorogenic acid exhibit the most pronounced binding energies. The docking scores for these compounds were determined to be -11.4, -10.0, -10.0, and -10.0 kcal/mol, respectively. These energy values indicate that these molecules bind to the receptor with a high affinity. Other compounds listed in the table generally possess binding energies of -6.0 or more negative scores (Kurt et al., 2020). Kurt (2022). Upon a detailed analysis, it was discerned that Rutin, which has the lowest (the best) docking score, establishes pi-donor hydrogen bonds with TYR:334 and PHE:335 on the A chain, engages in a pi alkyl interaction with LEU:73, and forms conventional hydrogen bonds with ARG:293, PHE:292, TYR:338,121,69 THR:72, and SER:290. This multitude of interactions signifies that the molecule binds to the chain with considerable stability (Figure 1).

When the same analysis was conducted for hesperidin, it was observed that the molecule forms a hydrogen bond with PHE:292 and a carbon-hydrogen bond with SER:200 on the A chain of the AChE protein. These interactions appear to be sufficient for the molecule to bind robustly to the protein (Figure 2).

Another compound demonstrating the highest docking score, Luteolin, was found to bind to the protein through the A chain via hydrogen bonds from PHE:292, GLY:119, and SER:200, and through a Pi-Sigma bond from TYR:338 (Figure 3).

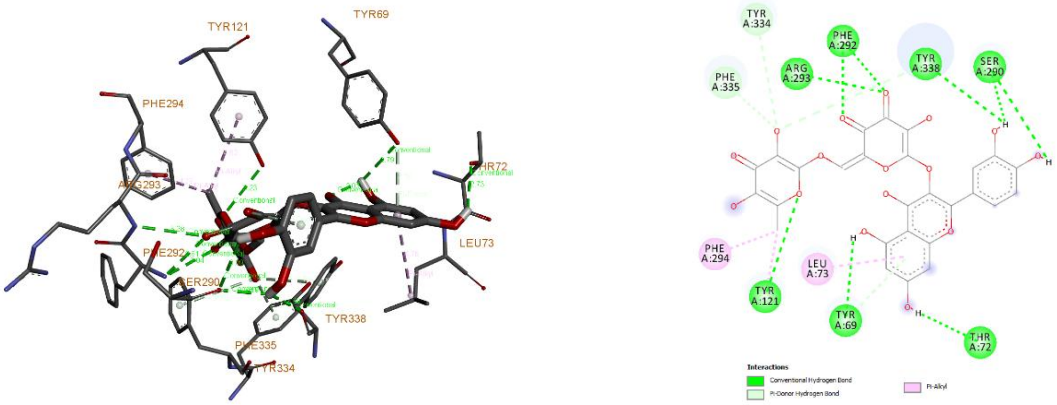


Figure 1. Docking interaction of Rutin with AChE-A Chain in 3D (left) and 2D (right).

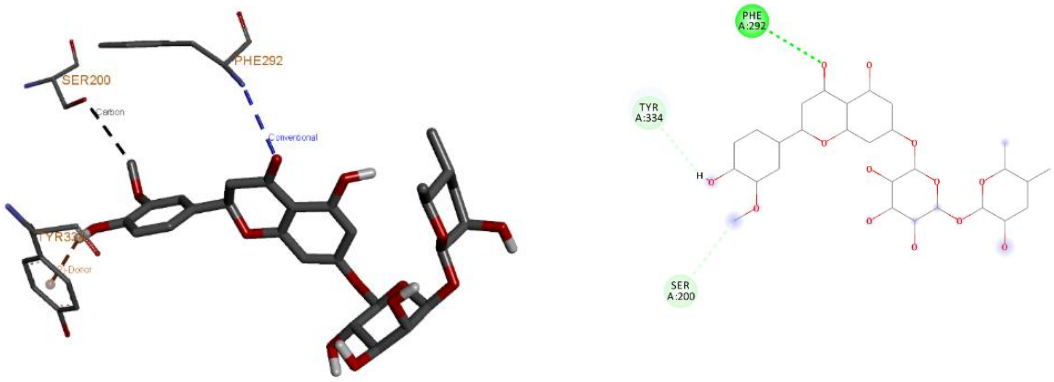


Figure 2. Docking interaction of Hesperidin with AChE-A Chain in 3D (left) and 2D (right).



Figure 3. Docking interaction of Luteolin with AChE-A Chain in 3D (left) and 2D (right).

Figure 4 illustrates the docking interaction of Chlorogenic acid with the AChE-A Chain, presented in both 3D (left) and 2D (right) representations. The 3D model on the left offers a spatial view of how Chlorogenic acid fits into the binding pocket of the AChE-A Chain, while the 2D diagram on the right provides a simplified representation of the key interactions. In the 3D model, we can observe the complex structure of Chlorogenic acid (shown in black) situated within the protein binding site. The amino acid residues involved in the interaction are depicted as stick models, with different colors representing various elements.

The 2D diagram elucidates the specific interactions between Chlorogenic acid and the protein residues: Pi-Sigma interactions are observed with PHE335 and TYR334, indicated by pink dashed lines. These interactions contribute to the stability of the binding. A hydrogen bond is formed with TRP83, shown by a purple dashed line. This bond likely plays a crucial role in anchoring the compound within the binding site. Several other amino acid residues are highlighted in green (e.g., ASP71, TYR121, TYR338, PHE294, PHE292, VAL291), suggesting their proximity to the binding site and potential involvement in creating a favorable binding environment. ARG293 is specifically labeled, indicating its importance in the binding interaction. The "Carbon pi-

H" notation suggests a possible pi-hydrogen interaction with this residue. The purple-colored residues (TRP83, HIS444) appear to be involved in key interactions, possibly through aromatic or electrostatic contributions. This detailed visualization of the docking interaction provides valuable insights into the molecular basis of Chlorogenic acid's binding to the AChE-A Chain, which could be crucial for understanding its potential pharmacological effects or for guiding future drug design efforts targeting this protein.

The binding sites and interactions of the remaining ligands with the protein are presented in Table 3 and Figure 5. Based on the data in the table, it can be posited that all evaluated molecules have potential as effective inhibitors for AChE. The table also suggests that binding predominantly occurs through the A chain, highlighting its significance in drug targeting.

Following the binding analyses in Table 3, attempts were made to statistically identify the most active regions in chains A and B. For this purpose, a Python program was prepared that counts each binding site in Table 3 individually. The results from the program can be seen in Table 4. Accordingly, the protein regions that interacted most with the ligands were TRY A:121, PHE A:292, TYR A:334, SER A:290, and GLU A:299 in chain A. The active region in chain B is significantly smaller compared to chain A.

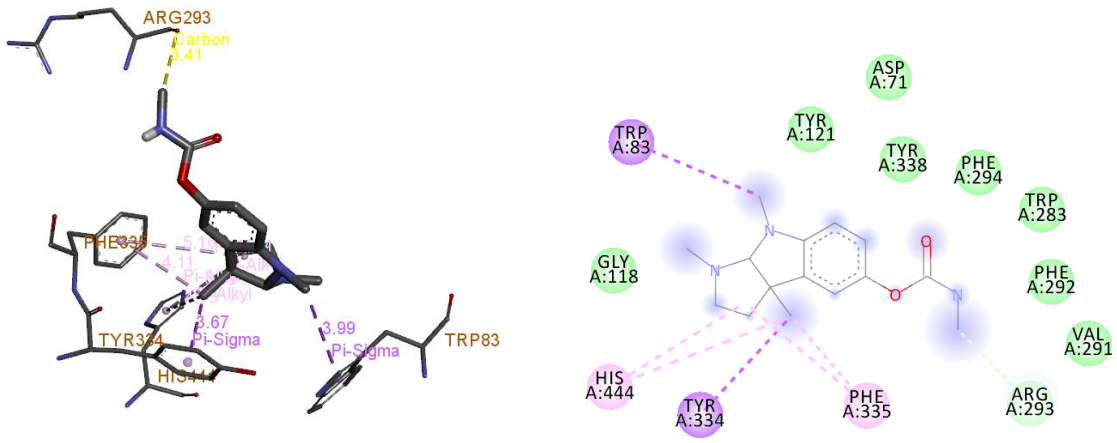


Figure 4. Docking interaction of Chlorogenic acid with AChE-A Chain in 3D (left) and 2D (right).

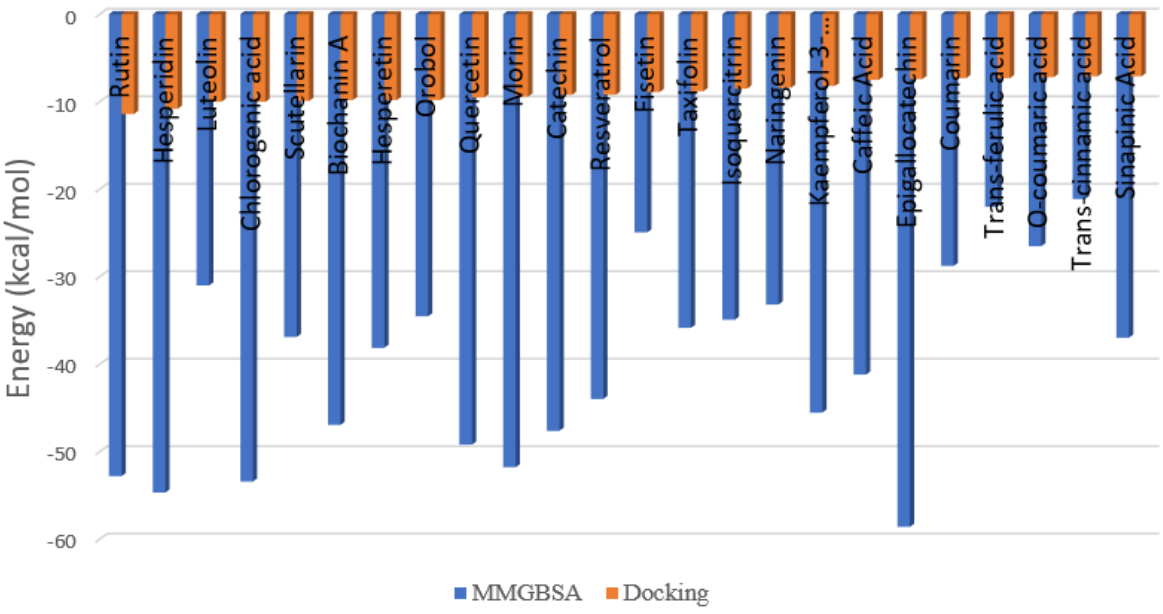


Figure 5. Docking Score and MM/GBSA energy of 24 selected molecules.

Table 3. Binding energies of the ligands to which the docking process was applied. Since the AChE molecule is two-chained, the docking process was applied separately for each chain, and the one with the lower energy was considered as the primary

Compund	Chain-a	Chain-b	Docking Score	Binding Chain	MM/GBSA Energy (kcal/mol)	Binding Sides
Rutin	-11.4	-10.7	-11.4	chain a	-52.792	pi-donor: TYR A: 334, PHE A: 335; hyrogen bond(s): ARG A: 293, PHE A: 292, TYR A: 338,121,69 THR A: 72, and SER A: 290
Physostigmine*	-8.30	-7.30	-8.30	chain a	-26.102*	vdw:ASP A:71 TYR A:338 PHE A:294 TRP A:283 GLY A:118 PHE A:292 VAL A:291 pi-sigma: TRP A:83 TYR A:334 pi-alkyl: HIS A:444 PHE A:335
Hesperidin	-10.8	-9.3	-10.8	chain a	-54.666	carbon-hydrogen bond:ARG A:293 hydrogen bond(s): PHE A: 292; carbon-hydrogen bond(s): SER A:200
Luteolin	-10	-10	-10	chain a	-30.993	hydrogen bond(s): PHE A :292, GLY A: 119, and SER A: 200; Pi-Sigma bond(s): TYR A: 338
Chlorogenic acid	-10	-6.8	-10	chain a	-53.408	pi-donor: SER A: 290, GLY A: 119, SER A: 200, TYR A: 121; Donor-donor: ARG A: 293; Pi donor: TYR A: 338
Scutellarin	-9.9	-9.2	-9.9	chain a	-36.892	hydrogen bond(s): TYR A:334, THR A: 72,ASP A: 71
Biochanin A	-9.8	-9.5	-9.8	chain a	-46.935	hydrogen bond(s): TYR A: 121, PHE A: 292; Pi-Donor: TYR A: 338;Pi-Sigma: TYR A :338
Hesperetin	-9.8	-8.9	-9.8	chain a	-38.127	hydrogen bond(s): SER A: 122,TYR A: 121, PHE A: 292, HIS A: 444; Carbon-Hydrogen Bonds: TYR A: 334, PHE A: 335; Pi-Sigma: TYR A: 83, TYR A: 338
Orobol	-9.1	-9.8	-9.8	cahin b	-34.515	hydrogen bond(s): HIS B: 824, GLN B:828
Quercetin	-9.5	-9.2	-9.5	chain a	-49.188	hydrogen bond(s): SER A: 290, ARG A:293, TYR A: 121
Morin	-9.2	-9.4	-9.4	cahin b	-51.763	hydrogen bond(s): SER B: 830, TYR B: 661, ASP B: 611
Catechin	-9.2	-9.2	-9.2	chain a	-47.607	donor-donor: PHE A: 292; pi-donor: TRP A: 283
Resveratrol	-9.2	-6.8	-9.2	chain a	-43.97	hydrogen bond(s): SER A: 290
Fisetin	-8.9	-6.9	-8.9	chain a	-24.935	hydrogen bond(s): SER A: 290, ARG A: 293, TYR A: 121, PHE A: 292
Taxifolin	-8.8	-8.7	-8.8	chain a	-35.834	hydrogen bond(s): SER A: 290, TYR A:121, PHE A: 292, GLN A: 288; Pi-Donor: TRP A: 283
Isoquercitrin	-8.5	-8.2	-8.5	chain a	-34.91	hydrogen bond(s): SER A: 290, TYR A :121, TYR A :338, PHE A:292, GLN A: 288; Pi-Donor: HIS A: 284, PHE A: 292; Carbon-Hydrogen: VAL A: 291
Naringenin	-8.4	-8.3	-8.4	chain a	-33.171	hydrogen bond(s): THR A: 72, TYR A: 121, PHE A:292
Kaempferol-3-glucoside	-8.1	-8.2	-8.2	cahin b	-45.531	hydrogen bond(s): PRO B: 772, THR B: 775; Carbon-Hydrogen Bonds: PRO B: 947,HIS B: 942,GLY B: 771
Caffeic Acid	-7.5	-5.7	-7.5	chain a	-41.171	hydrogen bond(s): GLU A: 199, TYR A: 334, TYR A: 338, ASP A: 71; Carbon-hydrogen bonds: THR A: 80, TRP A: 83
Epigallocatechin	-7.4	-6.7	-7.4	chain a	-58.583	hydrogen bond(s): SER A: 290, TYR A: 69
Coumarin	-7.3	-6.9	-7.3	chain a	-28.767	hydrogen bond(s): SER A: 200; Carbon-Hydrogen: HIS A:444
Trans-ferulic acid	-7.3	-7.3	-7.3	chain a	-22.007	hydrogen bond(s): ARG A: 293; Pi-donör: PYR A: 334
p-coumaric acid	-7.2	-7	-7.2	chain a	-26.51	hydrogen bond(s): TYR A: 121; Donor-donor: PHE A: 292

Table 3. Binding energies of the ligands to which the docking process was applied. Since the AChE molecule is two-chained, the docking process was applied separately for each chain, and the one with the lower energy was considered as the primary (contunied)

Compund	Chain-a	Chain-b	Docking Score	Binding Chain	MM/GBSA Energy (kcal/mol)	Binding Sides
Trans-cinnamic acid	-7.1	-7	-7.1	chain a	-21.109	hydrogen bond(s): TYR A: 334, TYR A: 338, ASP A: 71; Carbon-Hydrogen: TRP A: 83
Sinapinic Acid	-7.1	-6.5	-7.1	chain a	-36.974	hydrogen bond(s): GLU A: 199; Pi-Sigma: TYR A: 334; Carbon-hydrogen bonds: TYR A: 121, SER A: 122, TRP A: 83, GLY A: 445
Ethyl protocatechuate	-6.8	-6.8	-6.8	chain a		hydrogen bond(s): TYR A: 334, GLU A: 199; Pi-Donor: TRP A: 83;Pi-Sigma: PHE A: 335
Gallic acid	-6.4	-6.5	-6.5	cahin b		hydrogen bond(s): TYR B: 661, ASP B: 611; Pi Donor: TRP B:623
Protocatechuic acid	-6.5	-6.3	-6.5	chain a		hydrogen bond(s): TYR A: 130, GLU A: 199;Pi Donor: TRY A:334; Pi-Sigma: TRP A:83
Salicylic Acid	-6.5	-6.2	-6.5	chain a		hydrogen bond(s): TYR A: 121, ASP A: 71, TYR A: 338, TYR A: 334
Syringic acid	-6.5	-5.1	-6.5	chain a		hydrogen bond(s): SER A: 290, TYR A: 121, TYR A: 338, PHE A:292; Carbon-Hydrogen: VAL A: 291; Pi-Sigma: TRP A: 283
Vanillic acid	-6.4	-6	-6.4	chain a		hydrogen bond(s): TYR A: 121, TYR A: 338, PHE A: 292; Carbon-Hydrogen: VAL A: 291
Shikimic acid	-6.1	-5.6	-6.1	chain a		hydrogen bond(s): TYR A: 334, TYR A: 121, TYR A: 130, GLU A: 199; Pi-Donör: TRP A: 83
Vanillin	-6	-5.3	-6	chain a		hydrogen bond(s): PHE A: 292, TYR A: 338, TYR A: 121; Carbon-Hydrogen: VAL A: 291
Hydroxybenzaldeyde	-5.8	-5.7	-5.8	chain a		hydrogen bond(s): TYR A: 121, ARG A: 293, PHE A: 292
Caffeine	-5.7	-5.7	-5.7	chain a		hydrogen bond(s): ASP A: 371, TYR A: 334, TYR A: 338, GLU A: 199; Carbon-Hydrogen Bonds: THR A: 80, TRP A: 83

Table 4: Count of binding sites from Table 3. Based on this, TRY A:121 has interacted the most with the docked ligands

Chain A		Chain B	
Binding Side	Count	Bindin Side	Count
TYR A: 121	15	TYR B: 661	2
PHE A: 292	13	ASP B: 611	2
TYR A: 338	13	HIS B: 824	1
TYR A: 334	10	SER B: 830	1
SER A: 290	9	PRO B: 772	1
GLU A: 199	6	THR B: 775	1
TRP A: 83	6	PRO B: 947	1
ARG A: 293	5	HIS B: 942	1
ASP A: 71	5	GLY B: 771	1
VAL A: 291	5		

3.2. Active Sites

Table 4 displays the results of docking studies with AChE and identifies the amino acid residues where ligands most frequently bind on the enzyme. In CHAIN A, aromatic amino acid residues such as TYR A: 121, PHE A: 292, and TYR A: 338 are observed to be common ligand binding sites. This suggests that ligands may form strong π-π interactions and hydrophobic contacts with these aromatic surfaces. In CHAIN B, interactions with various amino acids occur less frequently, indicating that ligands exhibit fewer specific interactions on CHAIN B compared to CHAIN A. We believe these findings will provide a foundation for a more detailed characterization of AChE's active sites and binding regions.

3.3. Molecular Dynamics Simulation and MM/GBSA Results:

The analysis of docking scores and MM/GBSA binding energies in Table 3 reveals a high affinity of a range of compounds to AChE, with several exhibiting particularly strong binding preferences. Compounds like Rutin and Hesperidin not only show favorable interactions with aromatic residues within Chain A, indicative of potent π-π interactions, but also display consistently better MMGBSA binding energies, suggesting their potential as high-efficiency AChE inhibitors. This specificity, particularly in the hydrophobic pocket of Chain A, may account for the enhanced interaction strength, and the varied binding sites observed across the compounds emphasize the role of individual residue interactions in binding efficacy. Collectively, these insights offer a comprehensive foundation for advancing these compounds in the development of Alzheimer's disease therapeutics.

Initially, a 2 ns preliminary trial was conducted for all molecules with docking energies better than -7.0 kcal/mol. Figure 5 shows the docking scores and MM/GBSA binding energies for the 24 selected molecules. Following this stage, MMGBSA energies were calculated and Table 3 was created.

Based on the data in Table 3, the 4 molecules showing the best MMGBSA binding energy were selected and compared with physostigmine, the current Alzheimer's disease drug on the market. All 4 of these molecules exhibited better MMGBSA values than physostigmine.

Consequently, the molecular dynamics simulation times of the selected chemicals and physostigmine were extended to 20 ns for re-examination. RMSF (Figure 6) and RMSD (Figure 7) graphs were plotted to examine the stability of the simulations.

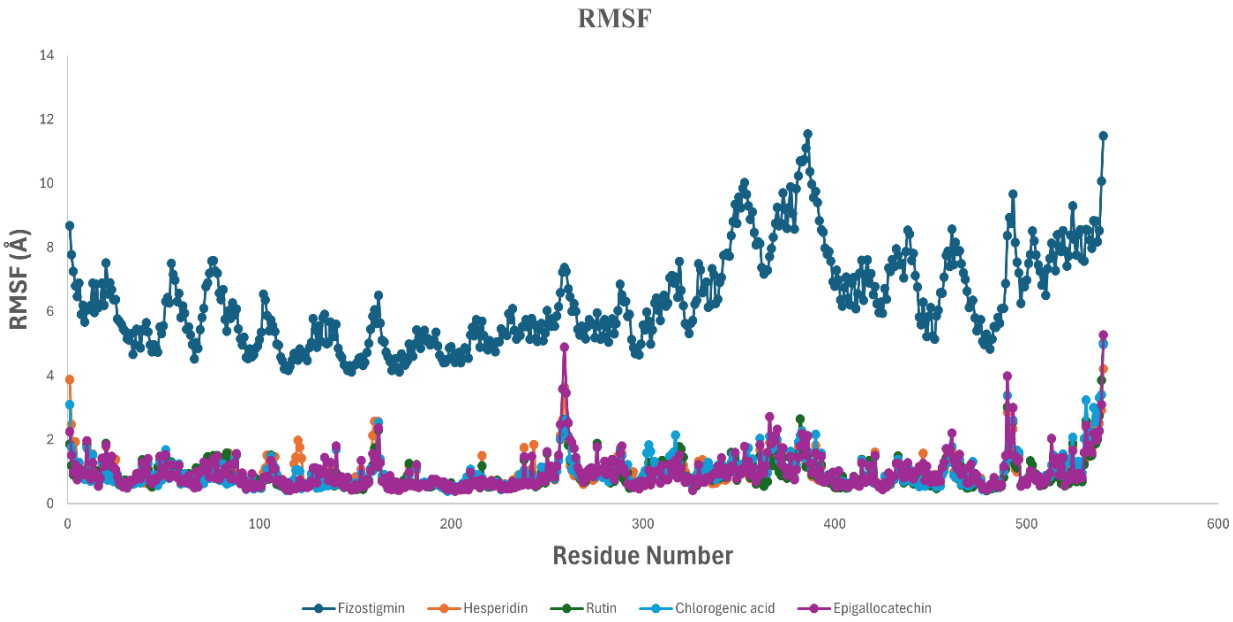


Figure 6. RMSF chart of Physostigmine, Hesperidin, Rutin, Chlorogenic acid, and Epigallocatechin.

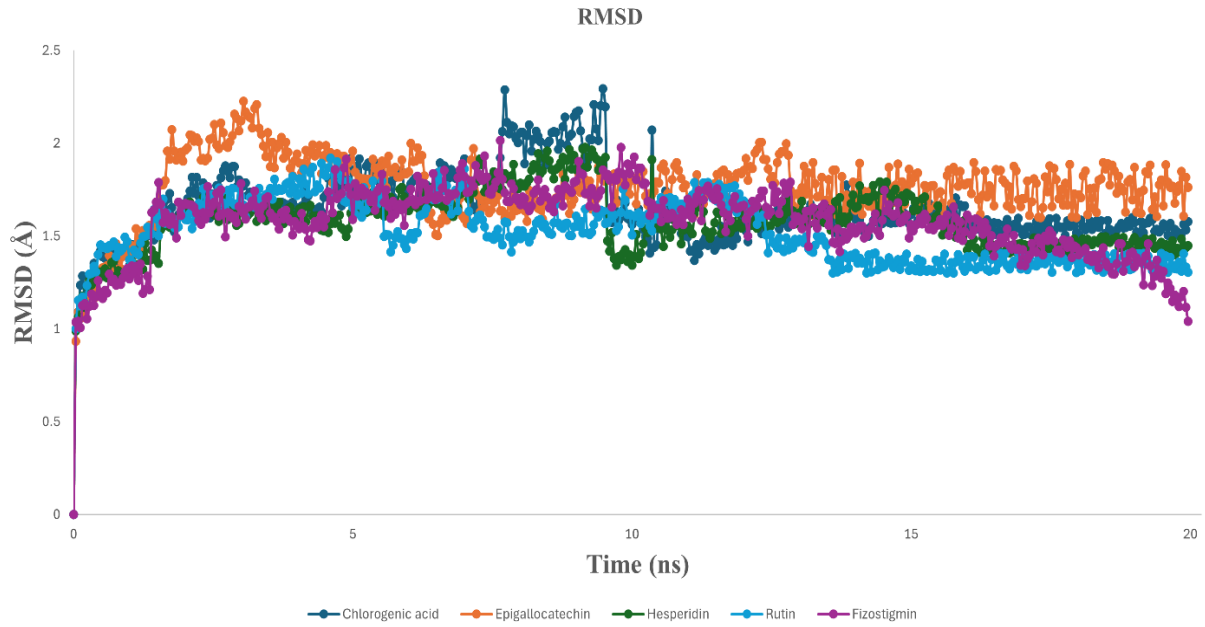


Figure 7. RMSD Chart of Physostigmine, Hesperidin, Rutin, Chlorogenic acid, and Epigallocatechin.

3.4. RMSF and RMSD

Figure 6 is an RMSF (Root Mean Square Fluctuation) analysis showing the behavior of five different components (Physostigmine, Hesperidin, Rutin, Chlorogenic acid, and Epigallocatechin) over time. RMSF is a frequently used measure in molecular dynamics simulations and indicates how much molecules or atoms deviate from their average positions. The graph shows atomic fluctuations between the 540-residue chain-A and ligands. Physostigmine exhibits generally higher RMSF values compared to other compounds, indicating that Physostigmine affects a wider region of the protein or shows more dynamic interactions. We can interpret this as physostigmine's binding being more flexible compared to other molecules.

For all components, significant peaks are observed especially in the 100-200 and 400-500 residue ranges. This indicates that these regions are more sensitive or flexible to ligand binding. Physostigmine significantly diverges from other compounds, especially in the 300-400 residue range. This suggests that Physostigmine shows a unique interaction in this region or significantly affects the conformation of this region.

Other compounds, Hesperidin, Rutin, Chlorogenic acid, and Epigallocatechin generally exhibit similar RMSF profiles. Among these molecules, Chlorogenic acid belongs to a phenolic acid group while the other 3 belong to the flavonoid group. This suggests that both phenolic acids and flavonoids may show similar effects, however, more detailed further studies focusing solely on this issue should be conducted to reach a definitive conclusion. All 4 molecules exhibited similar properties with minor differences.

Binding regions showing high RMSF values (e.g., 100-200 and 400-500 residue ranges) may indicate potential ligand binding regions. These regions may be flexible or adaptive parts where compounds interact.

Structural Stability: Regions showing low RMSF values (e.g., 0-100 and 200-300 residue ranges) may indicate more stable or rigid parts of the protein. These regions may be parts that maintain the structural integrity of the protein or are important for catalytic activity.

The RMSD (Root Mean Square Deviation) analysis in Figure 7 examines the structural changes of five different compounds (Chlorogenic acid, Epigallocatechin, Hesperidin, Rutin, and Physostigmine) over a 20-nanosecond molecular dynamics simulation. The analysis shows how the molecules deviate from their minimized initial geometries, and these changes can be interpreted as an indicator of the molecules' conformational dynamics.

All molecules show conformational changes at the start of the simulation. After approximately 5 nanoseconds (ns), RMSD values for most compounds reach a relatively stable plateau, fluctuating around 1.5 angstroms (Å). This indicates structural stability observed throughout the simulation. Epigallocatechin has the highest RMSD values, generally ranging between 1.7-2.0 Å. This suggests that Epigallocatechin undergoes more conformational changes compared to other components, thus exhibiting a more dynamic structure. Chlorogenic Acid, while generally following a stable course, shows a notable peak around 10 ns. This indicates that the molecule undergoes a temporary conformational change during a specific time period. Hesperidin and Rutin exhibit similar and relatively low RMSD profiles. Both molecules generally show a stable RMSD of 1.5 Å, indicating that they display relative structural consistency throughout the simulation. Physostigmine, on the other hand, shows a profile relatively different from the others: While initially exhibiting an RMSD profile similar to other molecules, a decrease in RMSD

values was observed in the final part of the simulation (between 15-20 ns). This decrease indicates that Physostigmine becomes structurally more stable in the later stages of the simulation.

4. Conclusion

In conclusion, the 20 ns simulation time appears to provide sufficient equilibration for all components studied. While Epigallocatechin exhibits a dynamic structure, other compounds generally show more stable structures. These differences are important for better understanding the functionality and interactions of molecules in biological systems.

This study aims to discover new AChE inhibitors that can be used in the treatment of Alzheimer's disease and to develop new, effective, and cost-efficient drugs that could serve as alternatives to physostigmine, which is currently used in treating Alzheimer's disase symptoms.

Molecules obtained from selected plant extracts have played a critical role in identifying candidate molecules with AChE enzyme inhibition potential. Docking studies, molecular dynamics simulations, and MM/GBSA analyses have demonstrated that these molecules can effectively inhibit this enzyme by binding to AChE with high affinity.

Author Contributions

The percentages of the authors' contributions are presented below. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

	B.K.	M.E.	A.B.
C	40	30	30
D	40	30	30
S	40	30	30
DCP	40	30	30
DAI	40	30	30
L	40	30	30
W	40	30	30
CR	40	30	30
SR	40	30	30
PM	40	30	30

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management

Conflict of Interest

Authors declare there is no conflict of interest

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because there was no study on animals or humans.

References

Baran MF, Keskin C, Baran A, Eftekhari A, Omarova S, Khalilov R, Atalar MN. 2023. The investigation of the chemical composition and applicability of gold nanoparticles synthesized with Amygdalus communis (almond) leaf aqueous extract as antimicrobial and anticancer agents. Molecules, 28(6): 2428. https://doi.org/10.3390/molecules28062428

Benfante R, Di Lascio S, Cardani S, Fornasari D. 2021. Acetylcholinesterase inhibitors targeting the cholinergic anti-inflammatory pathway: a new therapeutic perspective in aging-related disorders. Aging Clin Exp Res, 33(4): 823-834. https://doi.org/10.1007/s40520-019-01359-4

Berman HM. 2000. The protein data bank. Nucleic Acids Res, 28(1): 235-242. https://doi.org/10.1093/nar/28.1.235.

BIOVIA, 2019. Discovery studio visualizer. Dassault Systèmes, San Diego, CA, USA, pp:152.

Bortolami M, Rocco D, Messore A, Di Santo R, Costi R, Madia VN, Pandolfi F. 2021. Acetylcholinesterase inhibitors for the treatment of Alzheimer's disease - a patent review (2016-present). Expert Opin Ther Pat, 31(5): 399-420. https://doi.org/10.1080/13543776.2021.1874344

Case DA, Aktulga HM, Belfon K, Ben-Shalom IY, Berryman JT, Brozell SR, Xiong Y. 2023. AMBER 2023. University of California, San Francisco, CA, USA, pp: 32.

Coelho Filho JM, Birks J. 2001. Physostigmine for dementia due to Alzheimer's disease. Cochrane Database Syst Rev, 2001(2): CD001499. https://doi.org/10.1002/14651858.CD001499

Dorronsoro I, Castro A, Martinez A. 2003. Peripheral and dual binding site inhibitors of acetylcholinesterase as neurodegenerative disease modifying agents. Expert Opin Ther Pat, 13(11): 1725-1732. https://doi.org/10.1517/13543776.13.11.1725

Eastman P, Swails J, Chodera JD, McGibbon RT, Zhao Y, Beauchamp KA, Pande VS. 2017. OpenMM 7: rapid development of high performance algorithms for molecular dynamics. PLoS Comput Biol, 13(7): e1005659. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005659

Eberhardt J, Santos-Martins D, Tillack AF, Forli S. 2021. AutoDock Vina 1.2.0: new docking methods, expanded force field, and Python bindings. J Chem Inf Model, 61(8): 3891-3898. https://doi.org/10.1021/acs.jcim.1c00203

Groom CR, Bruno IJ, Lightfoot MP, Ward SC. 2016. The Cambridge structural database. Acta Crystallogr B, 72(2): 171-179. https://doi.org/10.1107/S2052520616003954

Hampel H, Mesulam MM, Cuello AC, Farlow MR, Giacobini E, Grossberg GT, Khachaturian ZS. 2018. The cholinergic system in the pathophysiology and treatment of Alzheimer's disease. Brain, 141(7): 1917-1933. https://doi.org/10.1093/brain/awy132

Hopkins CW, Le Grand S, Walker RC, Roitberg AE. 2015. Long-time-step molecular dynamics through hydrogen mass repartitioning. J Chem Theory Comput, 11(4): 1864-1874. https://doi.org/10.1021/ct5010406

Howes MR, Perry NSL, Houghton PJ. 2003. Plants with traditional uses and activities, relevant to the management of Alzheimer's disease and other cognitive disorders. Phytother Res, 17(1): 1-18. https://doi.org/10.1002/ptr.1280

Huang L, Su T, Li X. 2013. Natural products as sources of new lead compounds for the treatment of Alzheimer's disease. Curr Top Med Chem, 13(15): 1864-1878. https://doi.org/10.2174/15680266113139990142

Jenike MA, Albert M, Baer L, Gunther J. 1990. Oral physostigmine as treatment for primary degenerative dementia: a double-blind placebo-controlled inpatient trial. J

Geriatr Psychiatry Neurol, 3(1): 13-16. https://doi.org/10.1177/089198879000300104

Kabir MT, Uddin MS, Begum MM, Thangapandiyan S, Rahman MS, Aleya L, Ashraf GM. 2019. Cholinesterase inhibitors for Alzheimer's disease: multitargeting strategy based on anti-Alzheimer's drugs repositioning. Curr Pharm Des, 25(33): 3519-3535. https://doi.org/10.2174/1381612825666191008103141

Kurt B, Temel H, Atlan M, Kaya S. 2020. Synthesis, characterization, DNA interaction and docking studies of novel Schiff base ligand derived from 2,6-diaminopyridine and its complexes. J Mol Struct, 1209: 127928. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.127928

Kurt B. 2022. Investigation of the potential inhibitor effects of lycorine on SARS-CoV-2 main protease (Mpro) using molecular dynamics simulations and MMPBSA. Int J Life Sci Biotechnol, 5(3): 424-435. https://doi.org/10.38001/ijlsb.1110761

Lustoza Rodrigues TCM, de Sousa NF, dos Santos AMF, Aires Guimarães RD, Scotti MT, Scotti L. 2023. Challenges and discoveries in polypharmacology of neurodegenerative diseases. Curr Top Med Chem, 23(5): 349-370. https://doi.org/10.2174/1568026623666230126112628

Mantegazza R, Vanoli F, Frangiamore R, Cavalcante P. 2020. Complement inhibition for the treatment of myasthenia gravis. Immunotargets Ther, 9: 317-331. https://doi.org/10.2147/ITT.S261414

Morris GM, Huey R, Lindstrom W, Sanner MF, Belew RK, Goodsell DS, Olson AJ. 2009. AutoDock4 and AutoDockTools4: automated docking with selective receptor flexibility. J Comput Chem, 30(16): 2785-2791. https://doi.org/10.1002/jcc.21256

Mukherjee PK, Kumar V, Mal M, Houghton PJ. 2007. Acetylcholinesterase inhibitors from plants. Phytomedicine, 14(4): 289-300. https://doi.org/10.1016/j.phymed.2007.02.002

Murray A, Faraoni M, Castro M, Alza N, Cavallaro V. 2013. Natural AChE inhibitors from plants and their contribution to Alzheimer's disease therapy. Curr Neuropharmacol, 11(4): 388-413. https://doi.org/10.2174/1570159X11311040004

Pence HE, Williams A. 2010. ChemSpider: an online chemical information resource. J Chem Educ, 87(11): 1123-1124. https://doi.org/10.1021/ed100697w

Pettersen EF, Goddard TD, Huang CC, Couch GS, Greenblatt DM, Meng EC, Ferrin TE. 2004. UCSF Chimera: a visualization system for exploratory research and analysis. J Comput Chem, 25(13): 1605-1612. https://doi.org/10.1002/jcc.20084

Punga AR, Stålberg E. 2009. Acetylcholinesterase inhibitors in MG: to be or not to be? Muscle Nerve, 39(6): 724-728. https://doi.org/10.1002/mus.21319

Ranjan N, Kumari M. 2017. Acetylcholinesterase inhibition by medicinal plants: a review. Ann Plant Sci, 6(6): 1640. https://doi.org/10.21746/aps.2017.06.003

Reale M, Costantini E. 2021. Cholinergic modulation of the immune system in neuroinflammatory diseases. Diseases, 9(2): 29. https://doi.org/10.3390/diseases9020029

Thal LJ, Fuld PA, Masur DM, Sharpless NS. 1983. Oral physostigmine and lecithin improve memory in Alzheimer disease. Ann Neurol, 13(5): 491-496. https://doi.org/10.1002/ana.410130504

Walczak-Nowicka ŁJ, Herbet M. 2021. Acetylcholinesterase inhibitors in the treatment of neurodegenerative diseases and the role of acetylcholinesterase in their pathogenesis. Int J Mol Sci, 22(17): 9290. https://doi.org/10.3390/ijms22179290

Zimmerman G, Soreq H. 2006. Termination and beyond: acetylcholinesterase as a modulator of synaptic transmission. Cell Tissue Res, 326(2): 655-669. https://doi.org/10.1007/s00441-006-0239-8

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1606513

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)
Cilt 8 - Sayı 3: 729-737 / Mayıs 2025
(Volume 8 - Issue 3: 729-737 / May 2025)

PATLATMALI KAZI ÇALIŞMALARINDA TİTREŞİM YAYILIM EŞİTLİKLERİNİN SAHA ÖLÇÜMLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI, BİR İNŞAAT PROJESİ ÖRNEĞİ

Tuğçe ÖNGEN[1]*

[1]*Dokuz Eylül University, Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering, 35390, İzmir, Türkiye*

Özet: Günümüzde kaya kütlelerinin parçalanarak taşınabilir duruma getirilmesinde mekanik kazının uzun süreler alması bu sebeple ekonomik olmaması, maruz kalınan gürültü süresinin artması, sert kayaçlarda kırıcı makinaların parçalama başarısının düşük olması gibi sebeplerden dolayı patlayıcı maddeler ve patlatma teknolojisi kaçınılmaz olarak uygulanmaktadır. Madencilik faaliyetlerinde yaygın olarak kullanılan patlatma teknolojisi aynı zamanda inşaat projelerinde temel kazısı ve alan düzeltme amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. İnşaat projelerinin çoğunlukla yerleşim yerlerine yakın alanlarda olması patlatmalı kazı çalışmalarının çevresel etkileri açısından problem yaratabilmektedir. Özellikle patlatma kaynaklı titreşimlerin Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği'nde izin verilen titreşim seviyesi limit değerlerine göre, proje alanına yakın yapılar üzerindeki etkisi titreşim yayılım denklemleri kullanılarak değerlendirilmelidir. Bu amaçla Muğla ili, Bodrum ilçesinde bir inşaat projesi alanında gerçekleştirilen patlatmalı kazı çalışmalarının çevre binalara ekisini değerlendirebilmek amacıyla titreşim ölçümleri gerçekleştirilerek titreşim yayılma eşitliği oluşturulmuştur. Saha özelinde elde edilen yayılım eşitliği ile Çevre Şehircilik ve İlkim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan Patlatma Tasarımları ve Patlatma Kaynaklı Çevresel Etkiler Kılavuzu'nda patlatma türü olarak inşaat alanı için verilen eşitlikler kullanılarak titreşim hızı tahminleri yapılmış ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda inşaat alanlarında kılavuzda verilen tahmin modellerinin kullanılarak çevresel etki değerlendirmesi yapılmasının uygun olmadığı, mutlaka sahada titreşim ölçümleri gerçekleştirilerek saha özelinde bir titreşim yayılım eşitliği elde edilmesinin çevre yapılara olası bir zararı önlemek için gerekli olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Patlatmalı kazı, Titreşim, Çevresel etki, Tahmin modelleri

Comparison of Vibration Propagation Equations with Field Measurements in Blasting Excavation Works: A Construction Project Case Study

Abstract: Explosive materials and blasting technology are inevitably employed in the fragmentation of rock masses to make them transportable. Blasting technology, widely used in mining activities, is also frequently utilized in construction projects for foundation excavation and site leveling. The proximity of construction projects to residential areas often creates challenges regarding the environmental impacts of blasting operations. In particular, the effects of blast-induced vibrations on structures near the project site should be evaluated using vibration propagation equations, by the vibration level limits permitted by the Environmental Noise Control Regulation. For this purpose, blast-induced vibration measurements were conducted at a construction project site in Bodrum to assess the impact of blasting activities on nearby buildings, and a site-specific vibration propagation equation was established. Using the propagation equation obtained specifically for the site, vibration velocity predictions were made and comparatively presented based on the equations provided for construction site blasting in the "Blasting Designs and Environmental Effects of Blasting Guide" published by the Ministry of Environment, Urbanization, and Climate Change. The study's results indicate that using the prediction models provided in the guide for environmental impact assessment at construction sites is inappropriate. Instead, conducting on-site vibration measurements to derive a site-specific vibration propagation equation is essential to prevent potential damage to nearby structures.

Keywords: Blasting excavation, Vibration, Environmental impact, Prediction models

***Sorumlu yazar (Corresponding author):** Dokuz Eylül University, Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering, 35390, İzmir, Türkiye
E mail: tugce.ongen@deu.edu.tr (T. ÖNGEN)
Tuğçe ÖNGEN https://orcid.org/0000-0001-9783-7330

Gönderi: 24 Aralık 2024 **Received:** December 24, 2024
Kabul: 22 Mart 2025 **Accepted:** March 22, 2025
Yayınlanma: 15 Mayıs 2025 **Published:** May 15, 2025

Cite as: Ongen T. 2025. Comparison of vibration propagation equations with field measurements in blasting excavation works: a construction project case study. BSJ Eng Sci, 8(3): 729-737.

1. Giriş

Giderek artan nüfusla birlikte şehirlerde inşaat projeleri de sürekli olarak artmaktadır. Bu projeler kapsamında, konaklama alanlarının yanı sıra altyapı çalışmaları, çevre düzenlenmelerini kapsayan inşaat alanlarında kapsamlı kazı çalışmaları yapılması gerekmektedir. Günümüzde kayaç kazısı çalışmaları teknik ve ekonomik açıdan ele alındığında iki sistem ile gerçekleştirilmesi mümkündür. Bu amaçla yapılacak kazı çalışmalarında kullanılan yöntemler iki ana başlıkla incelenebilir. Bunlardan birincisi kazıcı-kırıcı makinalar ile gerçekleştirilen mekanik kazı, ikincisi ise patlayıcı maddelerin kaya kütleleri içerisinde belirli sistematikle yerleştirilerek infilak ettirilmesi ve ortaya çıkan enerjinin kayacı parçalaması esasına dayanan patlatmalı kazı

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

çalışmalarıdır. Yüksek dayanımlı kayaçlar için teknik ve ekonomik açıdan değerlendirme yapılırsa patlatmalı kazı yöntemi öne çıkmaktadır. Şehir içi büyük ölçekli inşaat ve diğer altyapı projelerinin hemen hemen tamamında kaya kütlelerinin taşınabilir boyuta indirilmesi patlayıcı madde kullanılarak ekonomik olmaktadır. Patlayıcı madde kullanılarak kazı yapılacak şehir içi projesinde ise patlatma tasarımı proje çevresindeki yapıların patlatma sonucu oluşacak titreşimden olumsuz etkilenmemesi gözetilerek gerçekleştirilmektedir (Karakuş vd, 2018). Patlatma işlemleri sonucu patlayıcı madde enerjisinin bir kısmı kayacı parçalamak için kullanılırken bir kısmı da kaya kütlesinin içerisinde kaya kütle özelliklerine bağlı olarak titreşimler oluşturmaktadır. Diğer taraftan patlatmalar sonucu gürültü oluşumu, taş savrulması ve toz emisyonu da meydana gelmektedir. Patlatma işlerinin kaçınılmaz olarak yapıldığı kazı çalışmalarında gerekli emniyetli çalışma koşullarının sağlanmasına dikkat edilmesi, özellikle patlatma kaynaklı çevresel titreşim etkilerinin göz önüne alınarak gerekli teknik ve ekonomik şartların sağlanması gerekmektedir. Patlatma sonucu oluşan çevresel titreşim etkilerin ölçülmesi ve ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi amacıyla literatürde çok sayıda farklı yaklaşımlar mevcuttur. Genel bir değerlendirmeyle 1940'lı yıllardan sonra konuyla ilgili çalışmalar yoğunlaşarak devam etmiştir. Ayrıca çok sayıda araştırmacı tarafından farklı yaklaşım modelleri kullanılarak patlatma kaynaklı titreşimin çevre yapılara etkisi değerlendirilmiştir (Külekçi vd., 2017; Zhang vd., 2021; Öngen vd., 2018; Parida ve Mishra, 2015; Roy, 1991; Kuzu, 2011; Khandelwal ve Singh, 2006; Duvall ve Fogelson, 1962; Khan vd., 2025; Yuan vd., 2025; Saptono vd., 2024). Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde patlatma sonucu oluşan sismik dalgaların meydana getirdiği parçacık hızları ve frekans, çevreye olumsuz etki yaratmadaki en etkili parametrelerdir (Öngen vd., 2015). Patlatmalar sonucu oluşan yer sarsıntılarının yapılar üzerindeki etkisiyle ilgili ülkemizdeki yasal mevzuat Çevre ve Şehircilik Bakanlığının 30.10.2022 tarihinde Resmi Gazete'de yayınlanarak yürürlüğe giren 32029 sayılı Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği ile düzenlenmiştir (ÇŞB., 2022). Bu yönetmelikte verilen değerler maden ve taş ocakları ile benzeri alanlarda yapılan patlatmalı kazı çalışmaları sonucu oluşan titreşim seviyelerinin sahaya yakın yerüstü yapıları için verilen yasal sınır değerlerdir. Tablo 1'de frekansa bağlı sınır değerler verilmektedir.

Tablo 1. Çevresel gürültünün değerlendirilmesi ve yönetimi yönetmeliği maden ve taş ocakları ile benzeri alanlarda patlama nedeniyle oluşacak titreşimlerin en yakın yapıda yaratacağı zemin titreşimlerinin izin verilen en yüksek değerleri (ÇŞB, 2022)

Yapı Tipi	Binaların Temelinde En Yüksek Titreşim Hızı, (mm/sn) (frekansa göre, f=Hz)			Tüm frekanslar için en üst katın döşemesinde (tabanında)[2]
	f=1-10	f=10-50	f=50-100[1]	
1 Endüstriyel binalar	20	40	50	40
2 Evler,tuğla ve beton gibi dayanıklı yapılar	5	15	20	15
3 Titreşime duyarlı olup 1. ve 2. maddenin dışında kala binalar, tarihi ve doğal yapılar[3]	2	8	10	8

[1]100 devir/sn büyük frekanslar için, büyük titreşim düzeyine izin verilebilir.

[2]Birden fazla katlı binalar için, ölçümlerin hem binaların temelinde ham de en üst katın döşemesinde alınması gerekebilir.

[3]Tarihi ve doğal yapılar için belirlenen bu sınır değerler, yerinde yapılacak hassas, kapsamlı titreşim ölçümleri ve bilimsek çalışmalar ile kısıtlanabilir.

Ancak, ilgili Yönetmelikte sınır değerler tanımlanmış olsa da, patlatmalar sonucu oluşan titreşim seviyelerinin değerlendirilmesi ve etkisinin belirlenmesi çok değişkenli bir problemdir. Çevresel titreşim seviyesinin oluşmasında ve denetiminde temel değişkenler gecikme başına kullanılan patlayıcı miktarı ve patlatma yapılan nokta ile incelenen yapı arasındaki mesafedir. Bunların dışında patlatma paterni ve titreşimin yayıldığı kaya kütlesi ortamının özellikleri titreşimin iletileceği mesafe açısından önemli diğer değişkenlerdir. Özellikle titreşimin yayıldığı kaya kütlesi ortamının sayısallaştırılması ancak titreşim açısından incelenen bölgede yapılacak titreşim ölçümlerinin geri analizi ile belirlenebilmektedir. Bu çerçevede bir bölgede patlatma kaynaklı titreşimin dinamik yükün seviyesinin belirlenebilmesi için öncelikle o bölgede ön araştırma patlatması sırasında, titreşim ölçümleri yapılması, ölçüm sonuçlarının anlık patlayıcı miktarı, mesafe, patlatma paterni ve kaya kütle ortamının jeolojik özelliklerini içeren analiz metotları kullanarak ortaya koyulması gerekmektedir (Karakuş ve Öngen, 2022). Patlatmadan kaynaklanan titreşimlerin araştırılması, karakterize edilmesi ve etki mesafelerinin belirlenmesi için mesafe, şarj, jeolojik yapı ve yer sarsıntıları arasındaki ilişkinin önemi ile birlikte patlatmanın yönü ile incelenen bölgenin konumu göz önüne alınmalıdır. Bu ilişki, parametrelerin tümü kullanılarak eşitlik 1 ile ifade edilir (Duvall ve Fogelson, 1962)

$$PPV = K\left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{-\beta} \quad (1)$$

Burada; PPV : Bileşke parçacık hızı (mm/sn)

R : Titreşim ölçüm mesafesi (m)
Q : Gecikme başına düşen patlayıcı miktarı
K : Arazi katsayısı
β : Arazi sönümlenme katsayısı

Bu denklemde $R/\sqrt{Q}$ elamanına "ölçekli mesafe" denir. Patlatmalar sonucu oluşan titreşim seviyesi ve titreşim karakteristiği çok değişken olmakla birlikte ortaya koyulması, arazi ile ilgili K ve β katsayılarının tahmini veya bir başka yoldan hesaplanabilmesi sürekli yapılan titreşim ölçümleri ile mümkündür. Kısaca farklı ölçekli mesafelerde (farklı şarj miktarı ve farklı mesafelerde) yapılan atımlardan parçacık hız değerleri ölçülerek analizler yapılmakta ve böylece arazi ile ilgili K ve β katsayıları bulunmaktadır. ABD'nde, şimdi lağvedilmiş olan Birleşik Devletler Maden Genel Müdürlüğü (USBM) ve halen faal olan Açık Ocak Madencilik Rehabilitasyon ve Denetim Ofisi (OSMRE) tarafından yapılan veya yaptırılan veya yararlanılan çok sayıda titreşim ölçüm sonuçlarının analizi sonucunda bazı madencilik türleri ve patlatma yapılan işkollarında geçerli, yer titreşimi tahmin formülleri üretilmiştir. (ÇŞB, 2018). Patlatmadan kaynaklanan titreşim hızlarının değerlendirilmesi aşamasında, K ve β katsayılarından yararlanabilmek amacıyla bu tahmin formüllerine Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ÇED İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü tarafından 2018 yılında yayımlanan "Patlatma Tasarımları ve Patlatma Kaynaklı Çevresel Etkiler Kılavuzu"'nda da yer verilmiştir (Tablo 1). İnşaat kazılarında patlatma kaynaklı titreşimlerin çevresel etkileri, özellikle yerleşim alanlarına yakın projelerde önemli bir mühendislik problemidir. Mevcut literatürde, saha özelinde yapılan ölçümlerin gerekliliğine yeterince vurgu yapılmadığı görülmektedir. Özellikle Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan kılavuzdaki tahmin modellerinin her inşaat sahası için geçerli olup olmadığı konusu detaylı olarak incelenmemiştir. Bu çalışmada, Bodrum ili Yalıkavak ilçesinde bir inşaat projesi alanında temel kazısı amacıyla gerçekleştirilen patlatmalı kazı çalışmalarının çevre binalara ekisini değerlendirebilmek amacıyla titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiş ve saha özelinde titreşim yayılma karakteristiğini sunan matematiksel eşitlik elde edilmiştir. Çevre Şehircilik ve İlkim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan Patlatma Tasarımları ve Patlatma Kaynaklı Çevresel Etkiler Kılavuzu'nda patlatma türü olarak inşaat alanı için verilen eşitlikler kullanılarak titreşim hızı tahminleri yapılmış ve sahaya ait titreşim yayılım eşitliği ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda şehir içi inşaat alanlarında Tablo 1'de verilen tahmin modellerinin kullanılarak çevresel etki değerlendirmesi yapılması ve patlayıcı miktarı belirlemenin uygun olmadığı, mutlaka sahada deneme atımları gerçekleştirerek titreşim ölçümleri alınması ve saha özelinde bir titreşim yayılım eşitliği elde edilmesinin çevre yapılara olası bir zararı önlemek için gerekli olduğu görülmüştür. Çalışma, inşaat projelerinde yönetmelik eşitliklerinin doğrudan kullanılmasının çevresel etki değerlendirmelerinde yetersiz kalabileceğini göstermesi açısından literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, mevcut çalışmaların eksikliklerini gidermeye yönelik olarak saha ölçümlerine dayalı, daha güvenilir ve proje özelinde uygulanabilir yaklaşımların geliştirilmesi gerektiği ortaya konmuştur.

2. Materyal ve Yöntem

Bu araştırma Muğla ili, Bodrum ilçesi, Yalıkavak Mahallesinde bulunan inşaat sahasında gerçekleştirilmiştir. İnşaat temel kazısı amacıyla gerçekleştirilecek patlatma çalışmalarının proje sahasına yakın yerleşim yerlerine (binalara) etkisinin belirlenebilmesi için sahanın ve yerleşim birimlerinin bulunduğu bölgenin konumu ortaya konulmuştur (şekil 1).



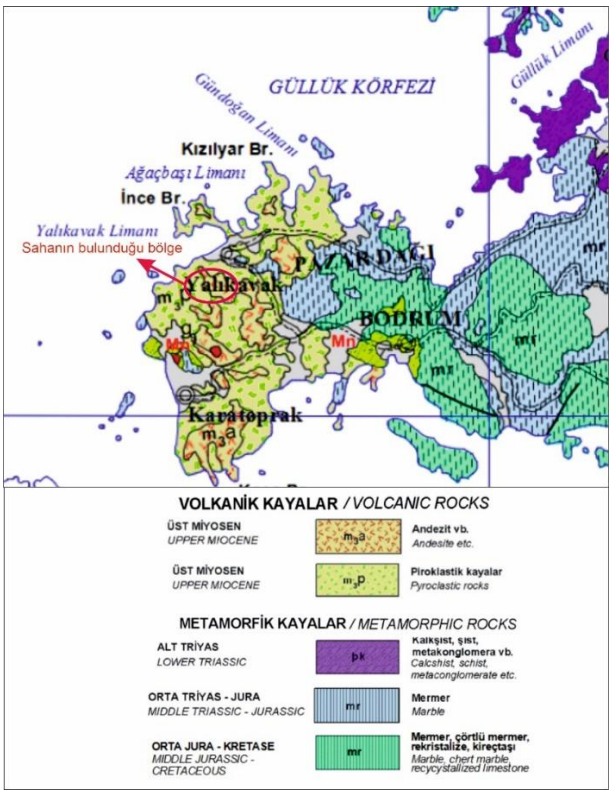
Şekil 1. İnşaat Sahası ve yakın binaların konumu.

Patlatmalı kazı çalışmaları yapılacak inşaat sahası konum olarak değerlendirildiğinde; sahaya yakın yapıların patlatmalı kazının çevresel titreşim etkisi açısından belirleyici olduğu görülmektedir. Ayrıca proje alanının doğuya doğru şevli bir yüzeyde bulunduğu görülmektedir. Bu gibi oluşumlar titreşim yayılma mekanizmasını ve taş savrulma ihtimalini etkilemektedir. Patlatmalar sonucu oluşan titreşimler arazinin topoğrafik yapısına göre farklı yayılım özellikleri göstermektedir. Özellikle hasar kriterlerinde etkili olan yüzey dalgaları, vadi, tepe gibi ani eğim değişikliklerinde farklı yayılma karakterizasyonu gösterebilmektedirler.

2.1. Bölgenin Genel Jeolojisi

Batı Anadolu'da yer alan Bodrum yarımadasında temel kayaları, Paleozoyik yaşta olan ve "Güllük formasyonu" olarak adlandırılan konglomera, kumtaşı ve şeyl ardalanmasından oluşan hafif metamorfik bir birim oluşturur. Mesozoyik yaşlı kayaçlar ise Triyas-Liyas dönemine ait dolomitik kireçtaşları (Pazardağı formasyonu), Liyas-Malm dönemine ait siltli ve marnlı kireçtaşları (Karadağ formasyonu) ve Malm-Senomaniyen dönemine ait pelajik kireçtaşları (Kışladağı formasyonu) ile tanımlanır. Bu birimlerin üzerinde ise Üst Kretase-Paleosen yaşlı vahşi filiş (Bodrum formasyonu) yer alır. Senozoyik kaya birimlerine gelindiğinde, süreç Oligosen yaşlı çökellerle (Koyunbaba formasyonu) başlar. Oligosen sonrasında yarımadada yoğun bir magmatizma meydana

gelmiş ve bu süreçte farklı evrelerde plütonik ve volkanik kayaçlar oluşmuştur. İlk olarak Orta Miyosen'de bir monzonit intrüzyonuna rastlanır. Daha sonra bölgede kalkalkalin özellikte bir volkanizma etkili olmuş ve tüf-aglomera birikintileri ile andezit, trakiandezit, latit ve dasit türü lavlar meydana gelmiştir. Kabuksal malzemelerle başlayan bu kalkalkalin volkanizma, zamanla manto kökenli alkali olivin bazaltik oluşumlara dönüşmüştür. Böylelikle ikinci volkanik evre başlamış ve bu dönemde dayklar şeklinde bazalt, trakibazalt ve trakit türü lavlar meydana gelmiştir. Çalışma alanında, Üst Miyosen'de volkanizmanın sona ermesinin ardından Alt Pliyosen'de oluşmuş kireçtaşlarına rastlanır. Daha sonraki dönemde, Kuvaterner devrinde travertenler, yamaç molozları, alüvyonlar ve muhtemelen komşu Kos adasından taşınan süngertaşı parçaları ile tüfler birikmiştir (Ercan vd, 1982). Çalışma alanının genel jeolojisini gösterir harita şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi çalışma sahasında hakim kayaçlar andezit vb. volkanik kayalardan oluşmaktadır.



Şekil 2. Çalışma alanının genel jeolojisi (MTA 2024, Avşar vd 2012'den değiştirilerek).

2.2 Patlatmalı Kazı Çalışmaları ve Titreşim Ölçümleri

Günümüz teknolojisinde kayaç kazısı iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Birincisi hidrolik kırıcı ile mekanik kazı, ikincisi ise patlayıcı maddeler ile gerçekleştirilen patlamalı kazıdır. Belirli sertliğin üzeride ve belirli miktarlardaki kayaç kazısının ekonomik ve çevresel etki açısından değerlendirildiğinde patlatmalı olarak yapılması kaçınılmazdır. Bu bilgiler çerçevesinde çalışma sahasında hakim kayaç yapısının andezitik karakterdeki volkanik kayalar olduğu görülmektedir (Şekil 3). Bu kayaçlar sert kaya sınıfında yer aldığından mekanik kazı ile diğer bir ifade ile hidrolik kırıcı ile kazı işlemi yapılması dayanımları yüksek olduğundan süre alacaktır. Ayrıca çevresel etki açısından değerlendirildiğinde mekanik kazıya maruziyet süresi patlatmalı kazı çalışmalarıyla kıyaslandığında süreklilik arz edeceğinden çıkan titreşim ve ses çevre yapılarda rahatsızlık verecektir. Patlatmalı kazı süresine maruziyet kısa olduğundan ve amaç inşaat projesine temel hazırlamak yani kayacı gevşetmek olduğundan meydana gelecek çevresel etkiler açısından da mekanik kazıya nazaran tercih edilmektedir. Çalışma sahasında da hakim kayaç andezit olduğundan mekanik kırıcılar ile kazı işlemi yapılması hem maliyet ve süre hem de çevreye sürekli ses kaynağı olarak verilecek zarar bakımından uygun değildir.



Şekil 3. Çalışma sahası hakim kayaç yapısı.

Sert, orta-sert kayaçların yerinden sökülmesi-kazılması için patlatmalı kazı çalışmaları yapılması kazı süresini kısaltacağı için çevreye ses açısından vereceği rahatsızlık daha az olacaktır. İnşaat alanlarında yapılan patlatmalar madencilikten farklı olarak gevşetme-çatlatma patlatması olarak yapılmaktadır. Dolayısıyla patlatma gruplarında delik sayıları daha az olup, kullanılan anlık patlayıcı miktarları da düşüktür. Ancak çalışma sahası içerisinde patlatmalı kazı çalışmaları yapılacak bölgeler riskli alanlara (yerleşim yeri binaları) çok yakın mesafede bulunmaktadır. Patlama kaynaklı titreşimlerin binalara zarar verip vermeyeceği değerlendirilmelidir. Bu amaçla söz konusu sahada 2022 Aralık ayında 4 adet 2023 Kasım ayında 4 adet olmak üzere toplam 8 adet patlatma operasyonu gerçekleştirilmiştir. Her ne kadar patlatmalar farklı yıllarda yapılmış olsa da yapıldıkları ay itibariyle patlatma olayları aynı hava koşullarında (yağışsız, rüzgarlı ve kuru hava) gerçekleştirilmiştir. Sahada uygulanan patlatmalardan patlatma-1'e ait patlatma paterni ve patlatma bölgesi görüntüsü örnek olarak şekil 4'te verilmektedir. Gerçekleştirilen patlatmalara ait teknik veriler tablo 2'de verilmiştir. Patlatma bölgeleri tepelik kısımda yer almaktadır. Bu patlatmalar sırasında farklı mesafelerden toplam 24 adet titreşim ölçümü alınmıştır. Ölçüm istasyonları ve patlatma alanları şekil 5'te verilmiştir.

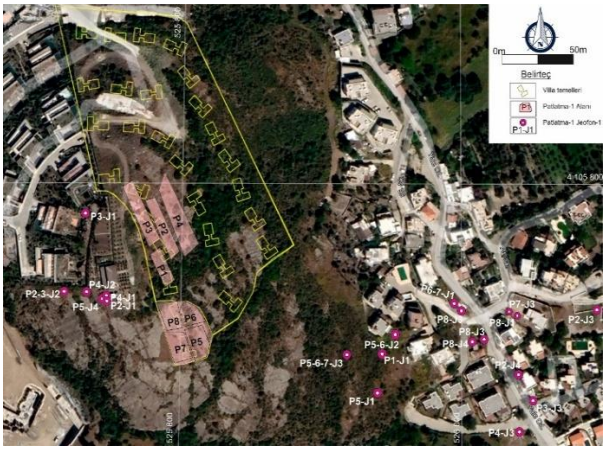


Şekil 4. Patlatma-1 bölgesi ve uygulanan patlatma paterni.

Tablo 2. Patlatmalara ait teknik veriler

Delik boyu (m)	3,0 - 7,5
Sıkılama boyu (m)	2,0-6,3
Delik Çapı (mm)	89
Dilim kalınlığı (m)	1,5
Deliklerarası Mesafe (m)	1,5
Anlık Patlayıcı Miktarı (kg/delik)	4,0-6,0

Ölçümler sırasında oluşturulan ölçüm istasyonlarının 6 adeti tepe bölgede kurulmuş olup, geriye kalan 18 adet ölçüm istasyonu vadi bölgesinde kurulmuştur. Tepe bölgede kurulan titreşim ölçüm cihazları patlatma bölgelerine en yakın konumda kalanlardır. Titreşim ölçümlerinde kalibrasyonu yapılmış olan Instantel marka 4 adet Minimate Blast ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihazlar saniyede 1024 örnek kaydetme kapasitesine sahiptir. En düşük kayıt hızı 0.127 mm/sn olmak koşuluyla, 254 mm/sn titreşim hızlarına kadar okuma yapabilmektedir. Sahadaki titreşim hızı ölçümlerinde patlatmalı kazı alanı ile sahanın güneydoğusunda ve batı-güneybatısında yer alan yerleşim birimleri yönü esas alınmıştır. Bu patlatmalardan elde edilen sonuçlar tablo 2'de sunulmuştur (Karakuş ve Öngen, 2022; Karakuş vd., 2023). Tablo 3' te görüldüğü gibi patlatma bölgesine en yakın 33 m'de titreşim ölçüm istasyonu kurularak 37,6 mm/sn bileşke parçacık hızı ölçümü gerçekleşmiştir.



Şekil 5. Patlatma bölgeleri, yerleşim birimleri ve titreşim ölçüm istasyonlarının konumları.

Tablo 3. Patlatmalarda kullanılan anlık patlayıcı miktarı, titreşim ölçüm mesafesi, ölçekli mesafe ve titreşim ölçümlerinden elde edilen bileşke parçacık hızları

Patlatma No	Ölçüm No	Titreşim hızı ölçüm mesafesi (m)	Jeofon yerleşim konumu	Anlık patlayıcı miktarı (kg)	Ölçekli mesafe	Bileşke parçacık hızı (PPV) (mm/sn)
1	1	165,0	Vadi	5,5	70,4	1,70
2	1	65,0	Tepe	4,5	30,6	17,9
	2	80,0	Tepe	4,5	37,7	16,0
	3	300,0	Vadi	4,5	141,4	1,84
	4	265,0	Vadi	4,5	124,9	7,04
3	1	33,0	Tepe	4,5	15,6	37,6
	2	73,0	Tepe	4,5	34,4	12,3
	3	310,0	Vadi	4,5	146,1	1,14
4	1	80,0	Tepe	4,0	40,0	11,59
	2	107,0	Tepe	4,0	53,5	7,91
5	1	125,5	Vadi	6,0	51,2	1,58
	2	131,0	Vadi	6,0	53,5	5,02
	3	99,1	Vadi	6,0	40,5	4,74
	4	65,3	Vadi	6,0	26,7	3,18
6	1	182,4	Vadi	6,0	74,5	1,49
	2	139,2	Vadi	6,0	56,8	5,60
	3	109,1	Vadi	6,0	44,5	4,43
7	1	192,5	Vadi	6,0	78,6	1,07
	2	230,8	Vadi	6,0	94,2	0,597
	3	112,9	Vadi	6,0	46,1	4,03
8	1	238,4	Vadi	6,0	97,3	0,298
	2	197,8	Vadi	6,0	80,8	0,897
	3	217,6	Vadi	6,0	88,8	0,755
	4	206,8	Vadi	6,0	84,4	0,63

2.3 Titreşim Ölçüm Sonuçlarının Analizi

8 adet patlatma operasyonu sırasında alınan 24 adet titreşim ölçümü sonucunda arazinin karakterize edilmesi amacıyla ölçekli mesafe-bileşke parçacık hızı grafiği çizilmiştir (Şekil 6). Sadece 6 adet ölçümün tepe bölgede olması ve vadi bölgesinde kurulan ölçüm istasyonlarının patlatma bölgesine çok yakın olmalarından dolayı, diğer bir ifade ile tepe ve vadi kısmında alınan ölçüm sayıları topografik etkiyi analiz etmek için yeterli sayıda olmadığından değerlendirme toplu olarak 24 adet ölçüm sonucuna göre yapılmıştır.

Yapılan analiz sonucunda araştırılan saha için arazi ve sönümlenme katsayıları K=2787.8 ve β=1.674 olarak R^2=0.78 (R:0.86) regresyon katsayısı ile belirlenmiştir. Veri analizi ve güç eğilim çizgisi (power trendline) oluşturma işlemleri Excel yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eğilim çizgisi ile elde edilen katsayılar eşitlik olarak ifade edildiğinde aşağıdaki gibi elde edilir (eşitlik 2).

$$PPV = 2787.8\left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{-1.674} \quad (2)$$

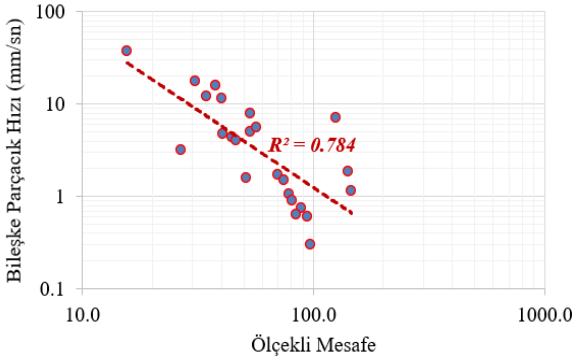
Ölçekli mesafe ile bileşke parçacık hızı arasındaki ilişkinin Eşitlik 2 kullanılarak bileşke parçacık hızı, sönümlenme mesafesi ya da anlık (gecikme başına düşen) patlayıcı miktarı bulunabilir.

3. Bulgular ve Tartışma

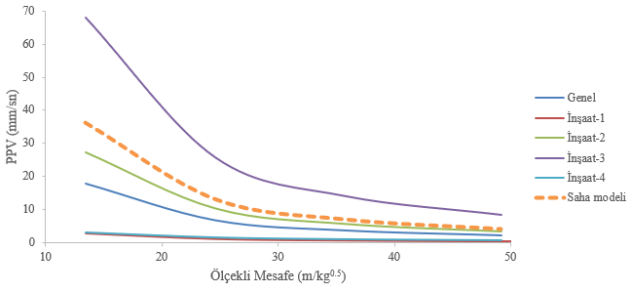
3.1. Tahmin Modelleri ile Saha Modelinin Karşılaştırılması

Çevre Şehircilik ve İlkim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan Patlatma Tasarımları ve Patlatma Kaynaklı Çevresel Etkiler Kılavuzu'nda önerilen titreşim yayılım formüllerinden Tablo 4'te verilen tahmin modellerinin inşaat sahalarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla Tablo 4'te verilen titreşim yayılım tahmin modelleri ile saha ölçümleri neticesinde elde edilen model birbirleri ile kıyaslanmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda hakim kayaç yapısı andezit olan inşaat patlatmaları için titreşim yayılım karakteristik eşitliklerinin kullanılabilirlikleri değerlendirilmiştir. Tablo 4'te görüldüğü gibi kılavuzda verilen tahmin modellerinin arazi ile ilgili K ve β katsayıları saha özelinde bulunan modelle kıyaslandığında farklı olduğu görülmektedir.

Yapılan değerlendirmede öncelikle anlık patlayıcı miktarını sabit tutarak, değişen mesafelerde meydana gelecek PPV değerleri elde edilmiş ve ölçekli mesafe ile arasındaki ilişkiyi göstermek için elde edilen sonuçlar grafik olarak ifade edilmiştir (Şekil 7). Şekil 6 incelendiğinde İnşaat-1, İnşaat-3 ve İnşaat-4 tahmin modelleri eğrisinin saha modelinden çok uzak olduğu görülmektedir. Genel tahmin modeli eğrisi ölçekli mesafe arttıkça saha modeli eğrisine yaklaşmaktadır. Grafiğe bakıldığında saha modeli eğrisine en yakın tahmin modeli eğrisi oluşturan tahmin modelinin İnşaat-2 olduğu görülmektedir. Ancak ölçekli mesafe değerinin 30'dan küçük olduğu durumlarda bu tahmin modeli eğrisi saha modeli eğrisinden uzaklaşmaktadır.



Şekil 6. Çalışma sahası ölçekli mesafe-bileşke parçacık hızı ilişkisi.



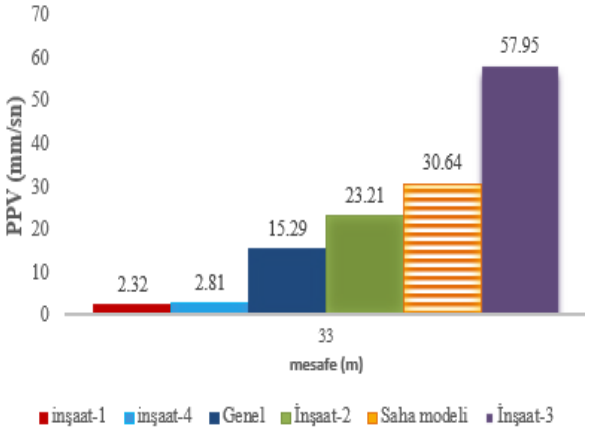
Şekil 7. Farklı tahmin modellerinden elde edilen "PPV-Ölçekli Mesafe" ilişkisi.

Tablo 4. Analiz için kullanılan tahmin modelleri

Tahmin modeli adı	Formül	Kaynak
Genel	PPV= 1140 x (SD)$^{-1.6}$	Dupont (1978)
İnşaat-1	PPV= 173 x (SD)$^{-1.6}$	Oriard (2005)
İnşaat-2	PPV= 1730 x (SD)$^{-1.6}$	Oriard (2005)
İnşaat-3	PPV= 4320 x (SD)$^{-1.6}$	Oriard (2005)
İnşaat-4	PPV= 53 x (SD)$^{-1.09}$	US Dept of Interior (1980)
Saha Modeli	PPV=2787.8 x (SD)$^{-1.674}$	Saha ölçümleri

PPV= bileşke parçacık hızı (mm/sn), SD= ölçekli mesafe (m/kg0.5).

Saha uygulamasında patlatma alanına en yakın titreşim ölçüm mesafesi olan 33 m için değerlendirme yapıldığında yakın mesafede meydana gelmesi öngörülen PPV değerleri şekil 8' de verilmiştir. Saha çalışmasında 33 m mesafedeki titreşim ölçüm istasyonunda 30.64 mm/sn PPV değeri elde edilmiştir. Tahmin modelleri ile elde edilen değerler gerçek değerden uzaktadır. Ancak İnşaat-3 modeli ile elde edilen değer gerçek değerin %49.5 fazlası olmasına rağmen, bu model saha modeline kıyasla yüksek titreşim hızı tahmini yaptığı için olası riski (yapılara titreşim etkisi ulaşmasını) minimize etmek amacıyla yakın mesafelerde riskli yapılar var ise kullanılabilecek tek tahmin modelidir. Böylece yönetmelikte verilen sınır değerlere göre bu model kullanılarak daha az anlık patlayıcı madde kullanılmış olacaktır. Saha modeli ile diğer tahmin modelleri arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını analiz etmek için SPSS (2024) programından faydalanılarak ANOVA testi yapılmıştır. Sonuçlar tablo 5 ve tablo 6'da sunulmaktadır.



Şekil 8. En yakın ölçüm istasyonunda meydana gelecek PPV değerleri.

Tablo 5. Tahmin değerleri

			% 95 Güven aralığı	
Tahmin modeli-PPV	Ortalama	Standart hata	Alt sınır	Üst sınır
Genel	2,517	,582	1,312	3,722
İnşaat-1	,381	,088	,199	,564
İnşaat-2	3,820	,884	1,992	5,648
İnşaat-3	9,540	2,206	4,975	14,104
İnşaat-4	,751	,107	,529	,972
Saha Modeli	4,731	1,163	2,326	7,136

Tablo 6. ANOVA testi-karşılaştırma sonuçları

Saha modeli-PPV(A)	Tahmin modeli-PPV(B)	Ortalama Fark (A-B)	Standart hata	P-değeri	Fark için %95 güven aralığı	
					Alt sınır	Üst sınır
Saha modeli	Genel	2,215*	0,580	0,013	0,314	4,115
	İnşaat-1	4,350*	1,074	0,007	0,833	7,867
	İnşaat-2	0,911	0,280	0,052	-,005	1,828
	İnşaat-3	-4,808*	1,044	0,002	-8,228	-1,389
	İnşaat-4	3,980*	1,058	0,015	0,518	7,443

*Ortalama farkı, %0.05 seviyesinde anlamlıdır.

Anova testi sonuçları incelendiğinde, en az ortalama farkın İnşaat-2 tahmin modelinde olduğu görülmektedir. P-değerine bakıldığında, P-değeri 0.05'ten küçükse, fark istatistiksel olarak anlamlıdır, yani iki grup birbirinden farklıdır. 0.05'ten büyükse, fark anlamlı değildir, yani iki grup birbirine benzerdir. Buna göre; İnşaat-2 modeline karşılık gelen p-değeri baz alınırsa, saha modeli ile aralarında anlamlı bir farklılık yoktur. Özetle, yakın mesafelerde (patlatma alanına 60 m uzaklıkta) meydana gelecek PPV değerini tahmin etmek için kılavuzda verilen tahmin modellerinin kullanılması gerçekçi sonuçlar elde etmek için uygun değildir. Mesafe arttıkça tahmin modelleri eğrileri birbirine yaklaşmakta olup, en uyumlu sonucu İnşaat-2 titreşim yayılım modeli verecek olsa da güvenli bölgede kalmak ve yapılara olası riski minimize etmek adına kılavuzda verilen modellerden en uygun model İnşaat-3 modelidir. Bu farklar araziyi tanımlayan katsayılardan gelmektedir. Bu sebeple en doğru yaklaşım patlatmalı kazı operasyonları sırasında titreşim ölçümleri alarak arazi modelini ortaya koymaktır.

4. Sonuçlar

Günümüzde çok sayıda inşaat projesi yapılmakta olup, proje alanlarında hakim kayaç özelliklerine göre kazı çalışmaları mekanik ya da patlatmalı olarak yapılmaktadır. Patlatmalı kazı çalışmalarında da en önemli unsur çevresel etkiler olup, proje alanlarının etrafındaki yapıların konumları belirleyici olmaktadır. Yapılan bu çalışma inşaat patlatmaları özelinde olduğu için, inşaat için olan tahmin modelleri ile genel model kullanılarak, sahadan alınan ölçümler neticesinde elde edilen saha modeli birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Her

modelde arazi ve sönümlenme katsayıları (k ve β) farklılık gösterdiğinden tahmin edilen PPV değerleri saha modeli ile elde edilen değerlerden farklıdır. Yapılan karşılaştırmaya göre yakın mesafelerde meydana gelecek PPV değerini tahmin etmek için kılavuzda verilen tahmin modellerinin kullanılması gerçekçi sonuçlar elde etmek için uygun değildir. Uzak mesafelerde bulunan yapılar için risk değerlendirmesi yaparken, İnşaat-2 titreşim yayılım modeli kullanılabilir olsa da, kısa mesafelerde bulunan yapılarda olası riski minimize etmek için kılavuzda verilen modellerden en uygun model İnşaat-3 modelidir. Etkilenilmesi düşünülen yapı ile sahanın konumları değişmeyeceğinden yapılacak tasarımlarda patlayıcı madde miktarının sınır tireşim değerlerine göre kısıtlanması gerekmektedir. Çalışma sonuçlarına göre İnşaat-2 ve İnşaat-3 eşitlikleri ve saha modeli kullanılarak yönetmelikte evler için verilen frekanstan bağımsız en düşük sınır değer 5mm/sn için kullanılabilecek anlık (gecikme başına) patlayıcı madde miktarı farklı mesafeler için hesaplanmış ve tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7'de görüldüğü gibi sahaya ait bir model oluşturulmamış ise, tahmin modelleri kullanılarak yapılacak olan patlayıcı miktarı hesaplarında olası çevresel riskleri ortadan kaldırmak için hakim kayacı andezit olan inşaat projelerinde İnşaat-3 eşitliğinin kullanılması daha uygun olacaktır. Buna rağmen şehiriçi ve yerleşimlere yakın inşaat projelerinde patlatma çalışmaları başlamadan kılavuzda verilen tahmin modellerinden yararlanılsa bile, yapılacak patlatma çalışmaları sırasında titreşim ölçümleri alarak saha modelinin oluşturulması çevresel riskleri önlemek açısından önemlidir.

Tablo 7. Farklı mesafelerde 5 mm/sn sınır değer için anlık (gecikme başına) kullanılacak en fazla patlayıcı madde miktarı

	Patlatma bölgesi ile yapı arasındaki mesafe			
Tahmin Modeli	50 m	100 m	150 m	200 m
İnşaat-2	1,7 kg/delik	6,7 kg/delik	15,1 kg/delik	26,8 kg/delik
İnşaat-3	0,5 kg/delik	2,1 kg/delik	4,8 kg/delik	8,5 kg/delik
Saha modeli	1,3 kg/delik	5,2 kg/delik	11,8 kg/delik	20,9kg/delik

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	T.Ö.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	0

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

Avşar Ö, Kurtuluş B, Kaçaroğlu F, Kuşcu G, Gürsu S. 2012. Muğla'nın jeotermal kaynakları ve doğal mineralli sularının envanteri projesi, sonuç raporu, Muğla Üniversitesi Rektörlüğü, Muğla, Türkiye, ss: 54.

ÇŞB. 2018. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, ÇED İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü, Patlatma tasarımları ve patlatma kaynaklı çevresel etkiler kılavuzu, Ankara, Türkiye, ss: 27.

ÇŞB. 2022. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği. Resmi Gazete, Sayı: 32029, Ankara, Türkiye.

Dupont A. 1978. Blasters Handbook 175th Anniversary 16th Edition, DUPONT, SBN-10: 1122712804, Wilmington, North Carolina, USA, pp: 145.

Duvall WI, Fogleson DE. 1962. Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibration. USBM-I 5968, OSTI ID:7128205.

Ercan T, Günay E, Türkecan A. 1982. Bodrum yarımadasının jeolojisi. 36. Türkiye Jeoloji Kurultayı, 10-14 Nisan, Ankara, Türkiye, ss: 37.

Karakuş D, Öngen T, Kılınç ME. 2023. Muğla İli, Bodrum İlçesi, Yalıkavak Mahallesi 696 Ada 69 Parseldeki 27 villa yapım projesi kapsamında yapılacak patlatmalı kazı çalışmalarının çevresel etkisinin belirlenmesi ve uygun patlatma tasarımı. Döner Sermaye Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Müh Fakültesi, İzmir, Türkiye, ss: 15.

Karakuş D, Öngen T, Özdoğan MV, Yenice H, Deliormanlı AH, İkiz U. 2018. Şehir içi patlatmalı kazı çalışmalarında çevresel titreşim limitlerine göre patlatma tasarımı. Madencilik, 57: 23-30.

Karakuş D, Öngen T. 2022. AKFEN Gayrimenkul Yatırım Ortaklığı'nın Muğla İli Bodrum İlçesi Yalıkavak Mahallesi 696 ada 69 parseldeki projesi patlatmalı kazı çevresel etkisi. Döner Sermaye Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Müh Fakültesi, İzmir, Türkiye, ss: 63.

Khan MFH, Hossain MJ, Ahmed MT, Monir MU, Rahman MA, Sweety TS, Akash FA, Shovon SM. 2025. Ground vibration effect

evaluation due to blasting operations. Heliyon, 11(2): https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41759.

Khandelwal M, Singh TN. 2006. Evaluation of blast-induced ground vibration predictors. Soil Dynam Earthq Eng, 27(2):116-125.

Kuzu C. 2011. Taşocağı işletmeciliğinde patlatma kaynaklı etkiler. Maden Yer Bilim Derg, 2011: 64-72.

Külekçi G, Çapik M, Yılmaz AO. 2017. Effects of blasting foundation building excavation studies on constructions. 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 13-17 August, Granada, Spain, pp: 39-49.

MTA. 2024. 1/500.000 ölçekli jeoloji haritaları. https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/doc/DENIZLI.pdf (accessed date: November 23, 2024).

Oriard LL. 2005. Explosives Engineering, Construction Vibrations and Geotechnology. Intl Soc Explosives, ISBN-13: 978-1892396136, Cleveland, USA, pp: 680.

Öngen T, Karakuş D, Gönen A, Turan G. 2015. Hammadde ocaklarında patlatmalı kazı çalışmaları sonucu oluşan çevresel titreşimlerin iki farklı tahmin modeli ile değerlendirilmesi-örnek çalışma. 9. Uluslararası Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 14-15 Mayıs, İzmir, Türkiye, ss: 623-636.

Öngen T, Karakuş D, Konak G, Onur AH. 2018. Assessment of blast-induced vibration using various estimation models. J Afr Earth Sci, 145: 267-273.

Parida A, Mishra MK. 2015: Blast vibration analysis by different predictor approaches - a comparison. Procedia Earth Planet Sci, 11: 337-345. https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.070.

Roy PP, 1991: Prediction and control of ground vibrations due to blasting. Colliery Guard, 239(7): 201-205.

Saptono S, Wiyono B, Vergiagara V, Yulianto MR, Nova P, Pambayu AK, Suharyadi H. 2024. Analysis of the effect of blasting in the form of ground vibration and air blast on residents' houses around the CV Handika Karya mine. AIP Conference Proceedings, 2-6 December, Melbourne, Australia, 3019: 070003.

SPSS Statics, 2024: Version 30.0.0, IBM.

US Dept of Interior. 1980. Office of surface mining reclamation and enforcement. USBM RI 8507. Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting, United States Bureau of Mines Report of Investigation 8507, Pittsburgh, PA, USA, pp: 120.

Yuan H, Zou Y, Li H, Ji S, Gu Z, He L, Hu R. 2025. Assessment of peak particle velocity of blast vibration using hybrid soft computing approaches. J Comput Des Eng, 12(2): 154-176.

Zhang X, Nguyen H, Choi Y, Bui XN, Zhou J. 2021. Novel extreme learning machine-multi-verse optimization model for predicting peak particle velocity induced by mine blasting. Nat Resour Res, 30: 4735-4751. https://doi.org/10.1007/s11053-021-09960-z.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1641225

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 738-746 / May 2025

DESIGN AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF A HYDRAULIC MOBILE ELEVATING WORK PLATFORM

Oguz GUNEY[1], Omer Bugra SEYMEN[1], Tolga GUNEY[1], Sinan DUZENLI[1], Mucahit SOYASLAN[2]*

[1]*Yektamak Machinery Engineering Manufacturing Industry and Trade Inc., 54600, Sakarya, Türkiye*
[2]*Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Mechatronics Engineering, 54060, Sakarya, Türkiye*

Abstract: Mobile Elevating Work Platforms (MEWPs) can provide speed and flexibility, especially in areas such as painting, maintenance, cleaning, and warehouse operations, which require overhead access. This study presents the design and finite element analysis (FEA) of a novel hydraulic MEWP that enables both vertical and horizontal movement, enhancing operational flexibility and personnel safety compared to conventional systems. The main frame of the platform is designed to be movable and foldable, with stabilization legs that secure it in place during operation. The platform design includes a vertically movable section on the main frame and a horizontally movable suspension section attached to this part. Analyses were performed under maximum loading conditions. For the structural analysis, boundary conditions and material properties were defined based on the maximum total load to be supported by the system, excluding the cabin section of the platform. Based on the analysis results, the maximum stress on the platform was measured at 54.8 MPa, while the highest displacement observed in the structure was 15.8 mm at the sling section. Considering the working and loading conditions, the safety factor of the designed mobile lifting system was found to be 4.4, and it was concluded that the system offers a viable solution in terms of functionality.

Keywords: Lifting system, Mechanical design, Finite element analysis, Mobile elevating work platform, MEWP

***Corresponding author:** Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Mechatronics Engineering, 54060, Sakarya, Türkiye
E mail: msoyaslan@subu.edu.tr (M. SOYASLAN)
Oguz GUNEY https://orcid.org/0009-0000-2006-6224
Omer Bugra SEYMEN https://orcid.org/0009-0009-9504-8245
Tolga GUNEY https://orcid.org/0009-0002-8767-3891
Sinan DUZENLI https://orcid.org/0009-0001-4230-2766
Mucahit SOYASLAN https://orcid.org/0000-0001-6658-5169

Received: February 18, 2025
Accepted: March 22, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Guney O, Seymen OB, Guney T, Duzenli S, Soyaslan M. 2025. Design and finite element analysis of a hydraulic mobile elevating work platform, BSJ Eng Sci, 8(3): 738-746.

1. Introduction

Mobile Elevating Work Platforms (MEWPs) for personnel lifting are essential tools in various industries, providing safe and efficient means for workers to reach elevated areas. Recent findings regarding the design, safety, usability, and technological advancements associated with these platforms are investigated. MEWPs can be categorized into three primary types based on their design, functionality, and application: scissor lifts, boom lifts, and mast lifts. Each category addresses specific operational needs and contributes to enhancing safety, usability, and productivity.

Scissor lifts utilize a crisscrossing mechanism to enable vertical lifting, offering stable and elevated access over a broad area. They are particularly useful in environments such as warehouses and construction sites, where equipment assembly and material handling at height are common tasks (Ermiş et al., 2021). Scissor lifts come in various models, including manual, electric, and hydraulic versions, catering to different operational requirements and load capacities (Kart et al., 2023). Advanced designs often incorporate features like automatic deployment of support arms and dynamic response to improve stability in windy conditions, as demonstrated by Jack et al. (2021), Bošnjak et al. (2009) and Augustyn et al. (2023). The safety and usability aspects of scissor lifts have been extensively studied. Pan et al. (2012) highlighted the importance of fall-arrest systems, revealing that many fatal injuries occur within the operational range of these platforms. Similarly, Pan et al. (2017) evaluated postural sway and impact forces during the ingress and egress of scissor lifts, providing data-driven recommendations to enhance operational safety. Recent innovations focus on improving maneuverability and ergonomics. Kart et al. (2023) proposed a hydraulic walking power steering-controlled scissor lift platform, specifically designed for confined spaces in industrial applications. This design combines enhanced safety features with ease of use, aligning with ergonomic principles.

Boom lifts are versatile platforms categorized into two main types: articulated and telescopic. Articulated boom lifts feature joints that allow the platform to navigate around obstacles, making them ideal for complex work environments like urban construction sites (Hu et al., 2017). Telescopic boom lifts, on the other hand, extend straight up and are better suited for tasks requiring high vertical reach without lateral movement (Li et al., 2022). The integration of advanced technologies in boom lifts

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

has further enhanced their functionality. Jia et al. (2012) explored adaptive neural network control for boom lift arms, demonstrating improved precision and responsiveness. This integration of artificial intelligence contributes significantly to safer and more efficient operations.

Mast lifts are compact platforms designed primarily for indoor use, where tight maneuvering is required. They often feature a vertical mast that can extend upwards, with a platform that can be raised and lowered. They are often employed in tasks like electrical work or warehouse maintenance (Li et al., 2022). Electric motors, pneumatic or hydraulic systems power these platforms. They are suitable for a wide range of tasks, from maintenance work to installation of fixtures in high spaces. Studies have shown that the structural integrity of the mast and its connections plays a significant role in maintaining stability during operation.

In this study, the design and finite element analysis (FEA) of a hydraulic MEWP were conducted. While the MEWP design shows similarities with mast lift systems, it incorporates notable differences. The lifting mechanism consists of supported dual-sided slides instead of a vertically oriented mast. This configuration allows the simultaneous lifting of two personnel instead of one, resulting in a more rigid structure. Additionally, the inclusion of auxiliary ladders enhances the design, making it a multifunctional product tailored for specialized applications. The study presents the components, mobility features, and characteristics of the designed system. The system's behaviour under maximum load conditions was analyzed through simulations and subsequently validated through experimental testing of the manufactured product.

2. Materials and Methods

The design of MEWPs is a complex process that integrates various engineering principles, safety standards, and user requirements. One of the primary considerations in the design of MEWPs is the structural integrity and safety under operational conditions. Researches underscore the necessity of rigorous testing and analysis in the design phase to ensure that MEWPs can withstand environmental stresses. FEA has become a cornerstone in this field. In the conducted studies, research has been carried out on the mechanical properties of mobile lifting systems using FEA to evaluate structural safety, assess issues such as tilting and manual decoupling, and validate design optimization (Uludamar and Tuccar, 2017; Karagulle et al., 2022; Huang et al., 2023; Zhang et al., 2023). Findings underscore the importance of detailed stress and deformation analyses for ensuring the reliability of mast lifts in industrial applications. Safety remains a paramount concern in MEWP operations. Updated guidelines emphasize the importance of proper training and adherence to safety protocols to minimize injury risks. Pan et al. (2017) provided foundational research on fall-arrest systems and ergonomic ingress/egress procedures, influencing industry standards. Innovations such as real-time monitoring systems and tactile sensors have significantly enhanced MEWP operations. He et al. (2023) introduced tactile mobile manipulators, showcasing the potential for autonomous operation in warehouses. These platforms use advanced sensors to interact with objects, improving load-handling efficiency. Jia et al. (2012) and Fang et al. (2023) highlighted the role of adaptive and fast luffing control systems in boom lifts, while Ouyang (2024) demonstrated the application of pulse width modulation (PWM) technology in lifting platform control systems, enabling dynamic speed adjustments for enhanced safety.

As the demand for safe and efficient lifting solutions grows, research will continue to focus on structural design, automation, advanced materials, and integrated safety systems. Areas such as AI-driven control systems, real-time structural monitoring, and ergonomic designs are expected to dominate future developments. These advancements aim to not only meet but exceed industry standards for safety and efficiency (Kennedy et al. 2020). MEWPs for personnel lifting highlight the critical importance of safety, usability, technological innovation, and training. Through continuous innovation and rigorous safety analyses, these platforms are evolving to address the growing demands of modern workplaces while ensuring the highest safety standards. Figure 1 shows the various types of industrial MEWPs.

2.1. Design of the Hydraulic Mobile Elevating Work Platform

Accurate positioning is critically important for efficiency and quality in processes such as painting, manufacturing, and maintenance. The developed system is designed to ensure personnel safety in high-risk areas and enable precise positioning. Most studies in the industry have focused on developing products for areas with access difficulties on planar surfaces. However, unlike previous studies, this research aims to design a mobile access platform capable of precise positioning in both the horizontal and vertical axes. A hydraulic telescopic cylinder has been utilized for the elevation of the designed MEWP. Additionally, to facilitate easy access for personnel working at height, an extra telescopic cylinder has been integrated to provide horizontal extension. The movement of the system on the ground is controlled by motors mounted on the wheels, allowing seamless access to the desired work areas and enabling personnel to be directed to the work site using suspension ropes. The system is operated via a control panel located on the command unit. Unlike the single telescopic lifting mechanisms commonly found in mast lifts, the proposed system features a lifting mechanism supported on both sides. This design choice enhances rigidity and safety while allowing two personnel to work simultaneously, ensuring a more stable and secure working environment. Figure 2 shows the closed and extended positions of the developed system.



Figure 1. a) Articulating boom lift (Anonymous, 2025a), b) Scissor-lift (Anonymous, 2025b) c) Vertical mast lift (Anonymous, 2025c), d) Pneumatic vertical lift (Anonymous, 2025d), e) Telescopic boom lift (Anonymous, 2025e), f) Telescopic maintenance lift (Anonymous, 2025f).

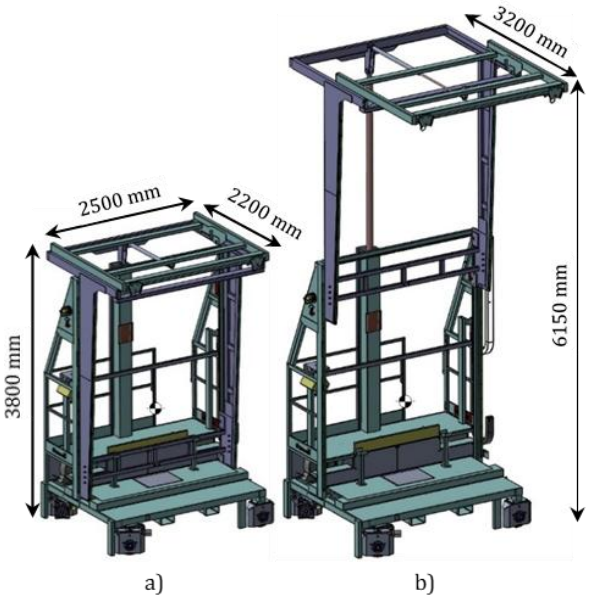


Figure 2. Positions of the developed system: a) Closed, b) Extended

2.2. Structural Analyses of the MEWP

Detailed 3D models were created using SolidWorks CAD software. Assembly and motion analyses were conducted to ensure compatibility between components. Simulations under various conditions were performed to identify potential issues in advance. Safety, functionality, durability, and ease of use were prioritized. A modular structure was preferred to facilitate maintenance and repair. The development of a secure and robust mobile access platform was achieved, enhancing operational flexibility and efficiency. The working conditions in which personnel are on the system are illustrated in Figure 3. As can be seen from the figure, two personnel are suspended by ropes on the system and are working on the work piece. This scenario also represents the maximum loading condition of the system.

Defining boundary conditions in FEA is a critical aspect that significantly influences the accuracy and reliability of the simulation results. Boundary conditions dictate how the model interacts with its environment, and improper definitions can lead to erroneous results, misinterpretations, and potentially unsafe designs. One of the primary reasons for the importance of boundary conditions is their role in accurately representing physical constraints and interactions.

During the development of the finite element model, quadrilateral, triangular, hexahedral, and tetrahedral elements were utilized. The modeling process primarily focused on the use of quadrilateral and hexahedral elements. Triangular and tetrahedral elements were incorporated strategically to define nodal points according to the geometries of the components while

maintaining element quality. Quadrilateral and hexahedral elements provide higher solution accuracy compared to triangular and tetrahedral elements. They offer a more precise representation of stress and deformation distributions, particularly in critical regions. Furthermore, models constructed using quadrilateral and hexahedral elements exhibit greater computational efficiency, leading to reduced solution times compared to those composed of triangular and tetrahedral elements. Therefore, special attention was given to maximizing the use of quadrilateral and hexahedral elements in the modeling process. The FEA model of the system is presented in Figure 4.

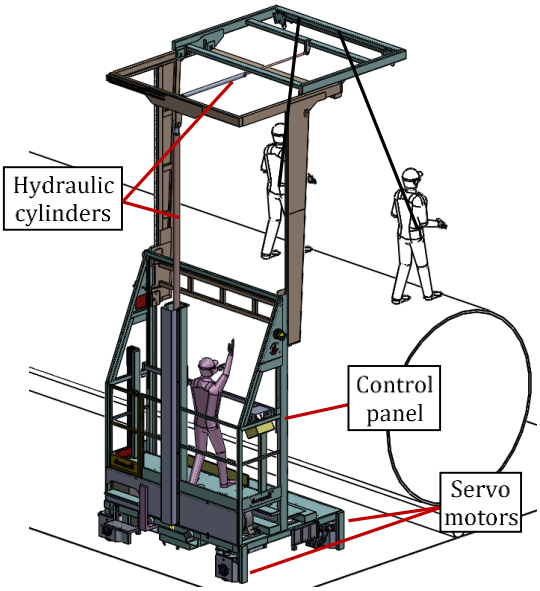


Figure 3. MEWP components and working conditions of the personnel.

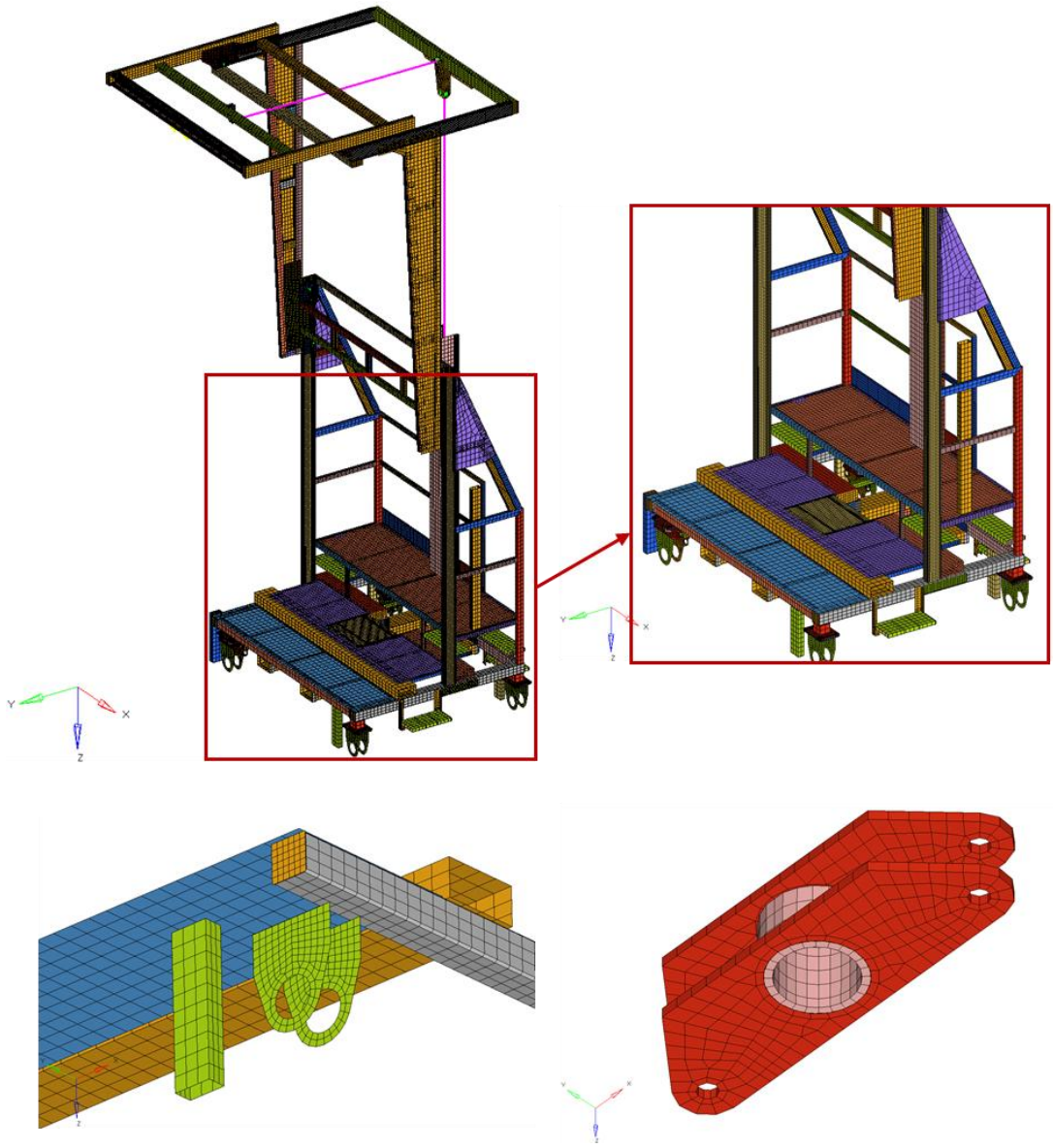


Figure 4. FEA model of the system.

In the MEWP, solid components were modeled using three-dimensional elements, while sheet metal parts were modeled using two-dimensional elements. 2D elements are used in modeling structures that are predominantly planar, such as thin plates, shells, and membrane structures. They are commonly applied in plane stress and plane strain problems. 2D elements can be quadrilateral (four-node bilinear) or triangular (three-node linear). The shape functions for a linear triangular element are given by equation 1. A is the area of the triangle, a_i, b_i, c_i are coefficients derived from the nodal coordinates. The strain-displacement matrix B for a triangular element is indicated in equation 2. The constants b_i and c_i are calculated using the nodal coordinates (x_i, y_i) of the element as in equation 3 (Cook et al., 2002; Zienkiewicz et al., 2013).

$$N_i = \frac{1}{2A}(a_i + b_i x + c_i y), \quad i = 1, 2, 3 \tag{1}$$

$$B = \frac{1}{2A}\begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & c_2 & 0 & c_3 \\ c_1 & b_1 & c_2 & b_2 & c_3 & b_3 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{pmatrix} b_1 = y_2 - y_3,\ b_2 = y_3 - y_1,\ b_3 = y_1 - y_2 \\ c_1 = x_3 - x_2,\ c_2 = x_1 - x_3,\ c_3 = x_2 - x_1 \end{pmatrix} \tag{3}$$

The shape functions for a bilinear quadrilateral element in natural coordinates (ξ, η) are given in equation 4 (Bathe, 2014).

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta), i = 1, 2, 3, 4 \tag{4}$$

The strain-displacement matrix B is derived using the Jacobian matrix J as shown in equation 5.

$$B = J^{-1}\frac{\partial N}{\partial(\xi, \eta)} \tag{5}$$

3D elements are necessary for problems requiring a full three-dimensional representation, such as solid mechanics applications. 3D elements are used for solid body analysis and can take the form of tetrahedral (four-node) or hexahedral (eight-node) elements. The shape functions for a linear tetrahedral element are given in equation 6. V is the volume of tetrahedron and a_i, b_i, c_i, d_i are coefficients derived from the nodal coordinates. The strain-displacement matrix B for a tetrahedral element is given in equation 7. The constants b_i, c_i and d_i are calculated using the nodal coordinates (x_i, y_i, z_i) of the element as in equation 8 (Zienkiewicz et al., 2013) (b_2, c_2 and d_2 can be calculated with similar equations).

$$N_i = \frac{1}{6V}(a_i + b_i x + c_i y + d_i z), \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{6}$$

$$B = \frac{1}{6V}\begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & b_3 & 0 & 0 & b_4 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & d_1 & 0 & 0 & d_2 & 0 & 0 & d_3 & 0 & 0 & d_4 \\ c_1 & b_1 & 0 & c_2 & b_2 & 0 & c_3 & b_3 & 0 & c_4 & b_4 & 0 \\ 0 & d_1 & c_1 & 0 & d_2 & c_2 & 0 & d_3 & c_3 & 0 & d_4 & c_4 \\ d_1 & 0 & b_1 & d_2 & 0 & b_2 & d_3 & 0 & b_3 & d_4 & 0 & b_4 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\begin{pmatrix} b_1 = (y_2 z_3 - y_3 z_2) + (y_3 z_4 - y_4 z_3) + (y_4 z_2 - y_2 z_4) \\ c_1 = (z_2 x_3 - z_3 x_2) + (z_3 x_4 - z_4 x_3) + (z_4 x_2 - z_2 x_4) \\ d_1 = (x_2 y_3 - x_3 y_2) + (x_3 y_4 - x_4 y_3) + (x_4 y_2 - x_2 y_4) \end{pmatrix} \tag{8}$$

The shape function for a trilinear hexahedral element in natural coordinates (ξ, η, ζ) are given in equation 9. The strain-displacement matrix B is derived using the Jacobian matrix J as shown in equation 10 (Bathe, 2014; Hughes, 2000).

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta), \quad i = 1, 2, \dots, 8 \tag{9}$$

$$B = J^{-1}\frac{\partial N}{\partial(\xi, \eta, \zeta)} \tag{10}$$

The entire MEWP structure was subjected to a standard gravitational acceleration of 9.8 m/s^2. St-37 steel, suitable for general purpose use, economical, and easily machinable, is preferred in many industrial applications. St-37 is a low carbon structural steel with good weldability. Due to the relatively low loads in the designed system, St-37 steel was deemed appropriate for all components. The material used has an elastic modulus of 210 GPa, a Poisson's ratio of 0.3, and a density of 7850 kg/m^3.

Constraints were applied to model the movements of the wheels attached to the MEWP, considering a total of six degrees of freedom: three translational and three rotational axes. Linear axes were constrained according to standard vehicle dynamics. In the analysis, the most challenging operating conditions were considered, with a total load of 300 kg, simulating two persons suspended in the middle of the structure and one person weighing 150 kg (Figure 5-a). The constrained freedoms in the linear axis are indicated in Figure 5-b, while all degrees of freedom in rotation were left unrestricted.

3. Results and Discussion

The system's durability has been rigorously tested under the maximum loads and most challenging conditions. For this purpose, a total load of 300 kg was applied to the component where the personnel ropes are attached. It is undesirable for the system to be excessively overdesigned or to fall below safety limits. According to the Machinery Safety Regulation (2006/42/EC), All metallic components that constitute a sling and are used in conjunction with it must have a working coefficient that ensures an adequate level of safety; as a general rule, this coefficient is equal to 4.

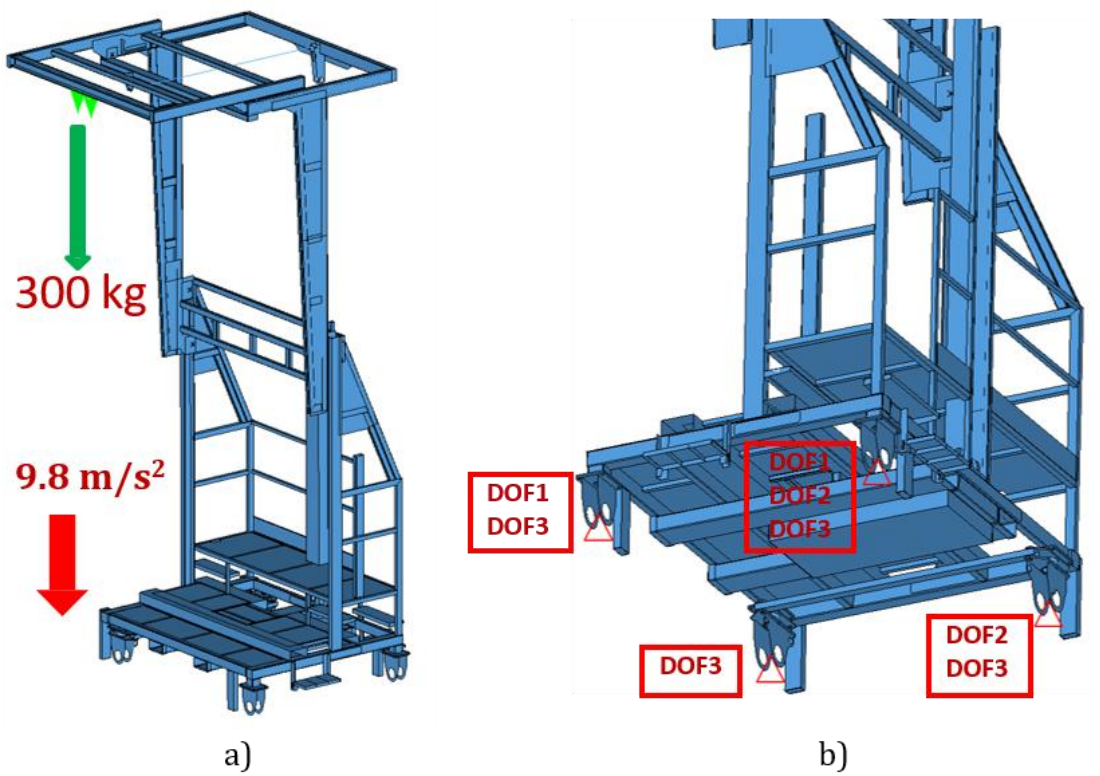


Figure 5. a) Boundary conditions-loading, b) degree of freedom for movement of MEWP.

An overly safe system leads to unnecessary material usage and increased costs, while a system with a low safety factor may compromise worker safety. Therefore, finite element analyses were repeated to ensure a minimum safety factor of 4, and material optimization was performed on the system components. In figure 6, the displacement results are presented.

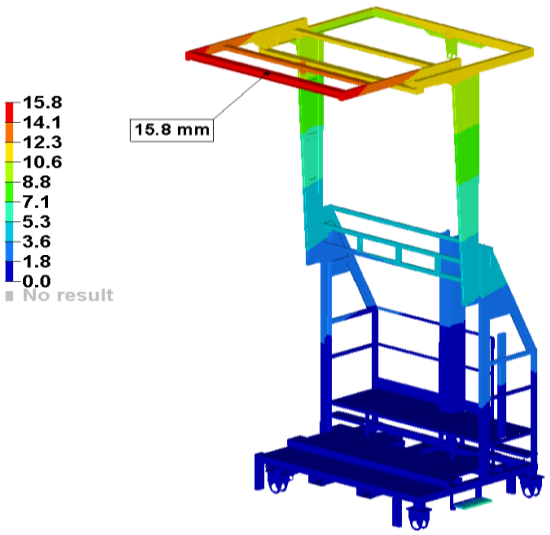


Figure 6. Displacement results for the system

The maximum stress value was observed in the profile located in the subframe section of the structure. A mesh convergence study was conducted specifically for this profile. As indicated in the Table 1 and visual representations in Figure 7, despite increasing the number of elements and reducing the mesh size, the difference in observed stress values decreased. When comparing mesh sizes, the difference in stress values was found to be less than 1%. The stress values obtained from the analysis were computed according to the Von Mises criterion.

Table 1. Mesh convergences values

Mesh Size	Stress Value	Total Elements	Difference (%)
20 mm	46.8 MPa	2304	-
15 mm	48.8 MPa	2544	4.2
10 mm	54.1 MPa	2976	9.8
9 mm	54.7 MPa	3294	1.1
8 mm	54.8 MPa	3748	0.2

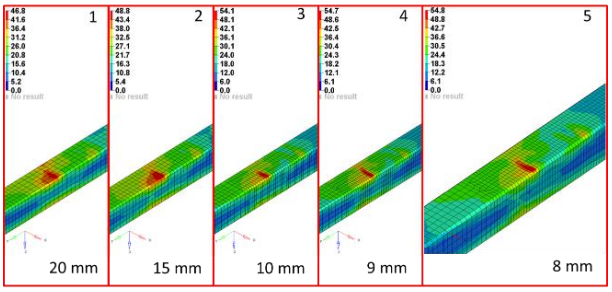


Figure 7. Mesh convergences stress values

The results of the optimized system are presented in Figure 8. The highest Von Mises stress observed in the structure was recorded as 54.8 MPa at the location

indicated in the Figure 8. The filtering applied in the right figure includes only values above 40 MPa. The maximum displacement observed in the structure was recorded as 15.8 mm at the region where the workers' ropes are suspended.

According to the structural static analysis results, the maximum displacement in the system is 15.8 mm, while the maximum stress is 54.8 MPa, which provides a safety factor of 4.4 relative to the yield strength of St-37 material (235 MPa). The maximum displacement value does not impact the operational functionality of the system. After achieving the optimum system design, the production phase has commenced. Additionally, in the final design, a ladder was added to the left side of the MEWP. This ladder is an optional component and does not impact the analysis results. Figure 9 displays the solid model of the finalized system and its manufactured version. The produced system was subjected to loads at the suspension points, and the results obtained were consistent with the analysis outcomes. Additionally, the hydraulic systems and servo motors of the system were controlled to test its precise positioning. All conducted tests confirmed that the manufactured system aligns with the analysis and design results.

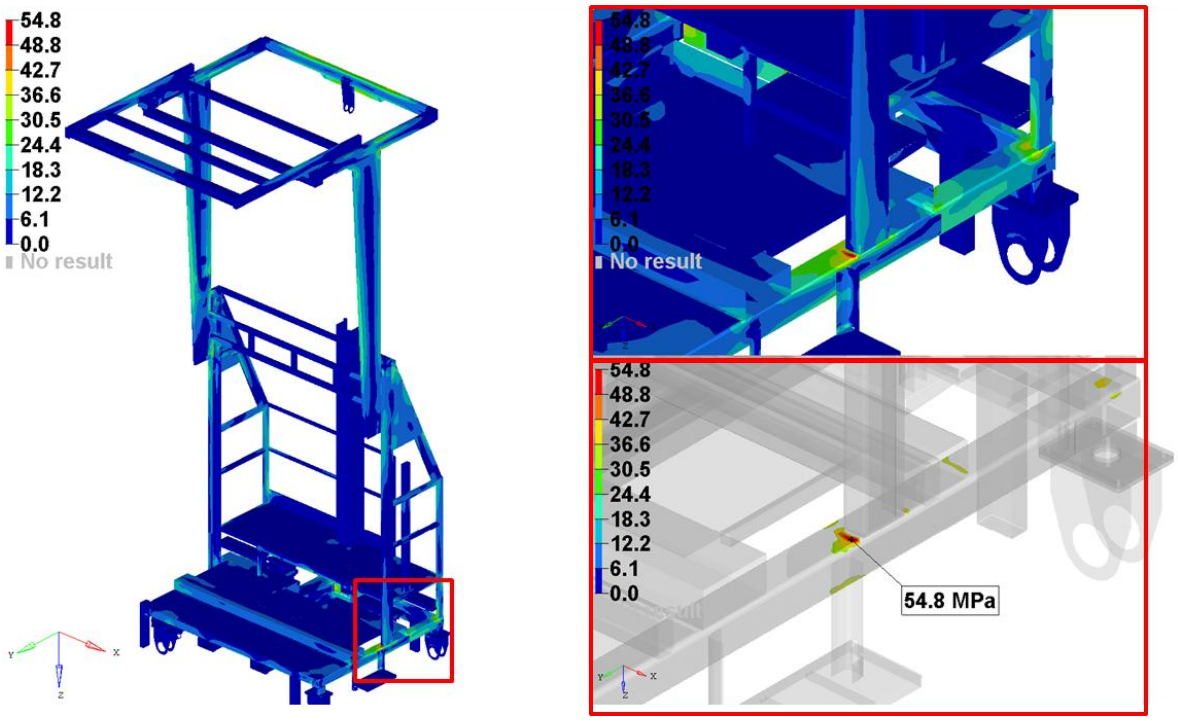


Figure 8. Stress analysis results of the system.



a) b)

Figure 9. a) Final 3-D design of the system, b) Produced system.

5. Conclusion

This study focused on the design, analysis, and testing of a hydraulic Mobile Elevating Work Platform (MEWP) capable of precise vertical and horizontal positioning. The platform was designed to ensure personnel safety and operational efficiency in high-risk environments, incorporating a dual-sided lifting mechanism that allows two personnel to work simultaneously. FEA was employed to evaluate the structural integrity of the system under maximum loading conditions, with a total load of 300 kg applied to simulate real-world operational scenarios. The analysis revealed a maximum Von Mises stress of 54.8 MPa and a maximum displacement of 15.8 mm, resulting in a safety factor of 4.4 relative to the yield strength of the St-37 steel used in the design.

These results confirm that the system meets stringent safety requirements while maintaining structural stability. The integration of hydraulic telescopic cylinders for vertical and horizontal movement, along with a modular design, enhances the platform's functionality and ease of maintenance. Experimental testing of the manufactured system validated the FEA results, demonstrating consistent performance under load and precise positioning capabilities. The addition of an optional ladder further improves accessibility without compromising the system's structural integrity. This research contributes to the advancement of MEWP technology by addressing the need for safer, more efficient, and versatile lifting solutions in industrial applications. The findings of this study provide a robust foundation for the development of next-generation MEWPs, ensuring they meet the evolving demands of modern workplaces while prioritizing worker safety and operational efficiency.

Author Contributions

The percentages of the authors' contributions are presented below. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

	O.G.	O.B.S.	T.G.	S.D.	M.S.
C	20	20	20	20	20
D	20	20	20	20	20
S	-	-	-	-	100
DCP	20	30	30	20	-
DAI	30	30	30	10	-
L	10	10	10	10	60
W	20	10	10	10	50
CR	20	20	20	20	20
SR	20	20	20	20	20
PM	25	25	25	25	-
FA	25	25	25	25	-

C=Concept, D=design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans.

Acknowledgements

This study was carried out by the Design Center of Yektamak Machinery Engineering Manufacturing Industry and Trade Inc.

References

Anonymous, 2025a. Aerial platform, genie Z40/23N articulating boom lift. URL: https://aerialplatform.ie/machines/genie-z40-23n-articulating-boom-lift/ (accessed date: February 7, 2025).

Anonymous. 2025b. Horizon platforms, 8.15m diesel scissor lift haulotte compact 10DX. URL: https://www.horizonplatforms.co.uk/services/hire/scissor-lifts/8.15m-diesel-scissor-lift-haulotte-compact-10dx (accessed date: February 7, 2025).

Anonymous. 2025c. Transeuro, vertical lifts. URL: https://www.transeuro.com.sg/vertical-lifts/ (accessed date: February 7, 2025).

Anonymous. 2025d. Wallker, pneumatic personal platforms. URL: https://wallker.com.tr/ (accessed date: February 7, 2025).

Anonymous. 2025e. Access platforms, LGMG T20J. URL: https://www.accessplatforms.co.uk/lgmg-t20j.html (accessed date: February 7, 2025)

Anonymous. 2025f. Material flow, MRO telescoping DC power hydraulic maintenance lift. URL: https://materialflow.com/p/mro-telescoping-dc-power-hydraulic-maintenance-lift/ (accessed date: February 7, 2025)

Augustyn M, Barski M, Chwał M, Stawiarski A. 2023. Numerical and experimental determination of the wind speed value causing catastrophe of the scissor lift. Appl Sci, 13(6): 3528.

Bathe KJ. 2014. Finite element procedures. Prentice Hall, Pearson Education, Massachusetts, USA, 2nd ed., pp: 338-420.

Bošnjak S, Zrnić N, Dragović B. 2009. Dynamic response of mobile elevating work platform under wind excitation. Stroj Vestn-J Mech Eng, 55(2): 104-113.

Cook RD, Malkus DS, Plesha ME, Witt RJ. 2002. Concepts and applications of finite element analysis. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 4th ed., pp: 202-268.

Ermiş K, Çalışkan M, Tanriverdi M. 2021. Design optimization of moveable moment stabilization system for access crane platforms. Acta Polytech, 61(1): 219-229.

Fang X, Zhang J, Zhang H, Zhang W. 2023. Fast luffing control of flexible boom of mobile elevated work platform with uncertain control input gain. Adv Mech Eng, 15(2): 1-14.

He Z, Zhang X, Jones S, Hauert S, Zhang D, Lepora NF. 2023. TacMMs: Tactile mobile manipulators for warehouse automation. IEEE Robot Autom Lett, 8(8): 4729-4736.

Hu H, Cai N, Cui L, Ren Y, Wang Y. 2017. A neural network–based sliding mode controller of folding-boom aerial work platform. Adv Mech Eng, 9(10): 1-9.

Huang S, Li B, Zhao J, Gao W, Wei Y, Huang Y. 2023. Finite element analysis of lifting platform of spreader based on the ANSYS workbench. In: Second International Conference on Electronic Information Engineering, Big Data, and Computer Technology, January 06-08, Xishuangbanna, China, pp: 781-

786.

Hughes TJR. 2000. The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis. Dover Publications, New York, USA, 1st ed., pp: 109-182.

Jack K, Essien U, Bamisaye O, Paul K, Ozoemela E, Okpo C. 2021. Enhancement of mobile scissor lifting system for windy environments. Niger J Technol, 40(2): 229-240.

Jia P, Li E, Liang Z, Qiang Y. 2012. Adaptive neural network control of an aerial work platform's arm. In: IEEE 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, July 6-8, Beijing, China, pp: 3567-3570.

Karagulle H, Akdag M, Bulbul İ. 2022. Design automation of a two scissors lift. Eur J Res Dev, 2(4): 178-191.

Kart S, Solmazyigit İ, Ovalı İ, Tan E. 2023. Conceptual design and prototype production of innovative hydraulic walking power steering controlled scissor lift platform. Eur J Res Dev, 3(4): 195-204.

Kennedy E, Guttag M, Bress T. 2020. Assessment of mobile elevating work platforms risks and review of changes introduced in new industry standards to address these hazards. ASME Int Mech Eng, 84669: 1-8.

Li X, Zhang Z, Yang X, Wu H, Li Y, Qu H. 2022. Type synthesis based on modular combination with virtual rotation center and application. Int J Rotat Mach, 1: 1-17.

Ouyang Z. 2024. Lifting platform pwm control system design combining distance detection. J Phys Conf Ser, 2787(1): 1-8.

Pan C, Chiou S, Kau T, Wimer B, Ning X, Keane P. 2017. Evaluation of postural sway and impact forces during ingress and egress of scissor lifts at elevations. Appl Ergon, 65: 152-162.

Pan CS, Powers JR, Hartsell JJ, Harris JR, Wimer BM, Dong RG, Wu JZ. 2012. Assessment of fall-arrest systems for scissor lift operators: computer modeling and manikin drop testing. Hum Factors, 54(3): 358-372.

Uludamar E, Tüccar G. 2017. Hidrolik kamyon boşaltma platformlarının dizayn ve analizi. Çukurova Üniv Müh Mim Fak Derg, 32(4): 55-62.

Zhang S, Chen Q, Lei M. 2023. Finite Element analysis on the rack of the JC-17B mobile lifting jack. Adv Mach Mater Sci Eng Appl, 40: 348-354.

Zienkiewicz OC, Taylor RL, Zhu JZ. 2013. The finite element method: its basis and fundamentals. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 7th ed., pp: 118-130.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1605982

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 747-756 / May 2025

PERFORMANCE EVALUATION OF G7 COUNTRIES IN TERMS OF PATENT APPLICATIONS

Sinan DÜNDAR[1]*

[1]*Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, 58140, Sivas, Türkiye*

Abstract: A patent is a legal right granted by a patent authority that gives the inventor or assignee exclusive rights to produce, use, sell and distribute an invention for a specified period of time. Patent acquisition offers numerous advantages related to the protection of inventions, enhancement of competitiveness, attraction of investors, generation of income, support for innovation, market expansion, and improvement of brand reputation for the individual or entity that holds the patent. Given the significance of the patent concept, the performance of the G7 countries regarding patent acquisition is handled as multi-criteria decision-making (MCDM) problem in this research. In the evaluation made over the total number of patent applications submitted over nine different technological domains between 2000-2020, the criteria weights were determined by MAXimum of Criterion (MaxC), Modified Preference Selection Index (MPSI) and LOgarithmic Percentage Change-driven Objective Weighting (LOPCOW) methods. By using these criteria weights which are combined with the Bonferroni Mean Operator, the MUltiple-TRIangles ScenarioS (MUTRISS) method was utilised for the performance rankings of G7 countries in terms of patent acquisition. As a result of the study, the success ranking of G7 countries in terms of patent applications was determined as USA, Japan, Germany, UK, France, Canada and Italy.

Keywords: Patent, G7 countries, MaxC, MPSI, LOPCOW, MUTRISS

Corresponding author: Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, 58140, Sivas, Türkiye
E mail: sinandundar@cumhuriyet.edu.tr (S. DÜNDAR)
Sinan DÜNDAR https://orcid.org/0000-0001-8061-3322

Received: December 23, 2024
Accepted: March 25, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Dündar S. 2025. Performance evaluation of G7 countries in terms of patent applications. BSJ Eng Sci, 8(3): 747-756.

1. Introduction

Intellectual property rights are widely acknowledged as fundamental components of the contemporary economic system. These rights are designed to foster economic and social development by safeguarding the innovative ideas and creative expressions of individuals and organizations. Within this framework, the patent system serves as a crucial instrument that empowers inventors to legally protect their innovations. Patents confer upon the owner of an invention the exclusive rights to produce, utilize, sell, or import the invention for a specified duration. These rights serve to reward the inventive contributions of individuals while simultaneously promoting the dissemination of technology and knowledge (WIPO, 2016). Furthermore, the patent system plays a pivotal role in fostering innovative ecosystems on a local and global scale, thereby contributing to economic growth, augmenting research and development investments, and facilitating the transfer of technology (Maskus, 2000). The concept of patents has evolved significantly over historical periods and has been addressed through various approaches within different legal systems. In contemporary contexts, patents extend beyond technological inventions; they are applicable across a diverse array of fields, including biotechnology, software, and business methods. This expansion necessitates a comprehensive examination of the legal, economic, and ethical dimensions associated with the concept of patents (Granstrand, 1999). Obtaining a patent for an invention significantly contributes to several key areas, including the provision of a competitive advantage (Granstrand, 1999), the encouragement of research and development (R&D) and innovation activities (Maskus, 2000), the facilitation of technology transfer and collaborative efforts (WIPO, 2016), the enhancement of opportunities to attract investors (Hall and Harhoff, 2012), and the establishment of a robust position in the global market (WIPO, 2016). The World Intellectual Property Organization (WIPO), the United States Patent and Trademark Office (USPTO), and the European Patent Office (EPO) are prominent institutions through which patent applications may be submitted on a global scale. WIPO is the global organisation that coordinates applications filed under the Patent Cooperation Treaty (PCT), which provides patent protection in more than one country with a single application (WIPO, 2016). USPTO is the authoritative entity responsible for the processing of patent and trademark applications within the United States while playing a crucial role, particularly in regions characterized by significant levels of technological innovation (USPTO, 2024). Operating with the aim of offering a common patent protection in European countries, the EPO facilitates the acquisition of valid patents in countries that are parties to the European

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

Patent Convention (EPC) (EPO, 2024). On a more local scale, the African Regional Intellectual Property Organization (ARIPO, 2024), the Gulf Cooperation Council Patent Office (GCCPO, 2024) and the Turkish Patent and Trademark Office (TURKPATENT, 2024) are other organisations that provide patent protection. The G7 countries, formally referred to as The Group of Seven, originated in the 1970s as an informal forum aimed at addressing economic challenges and coordinating policy responses among the world's major industrial powers. This initiative emerged during a period characterized by oil crises, financial instability, and increasing concerns regarding international economic governance. Initially organized as the Group of Six (G6) with the participation of France, West Germany, Italy, Japan, the United Kingdom, and the United States (Putnam & Bayne, 1984, p. 20), the group subsequently evolved into the G7 format with the inclusion of Canada in the following years (Bayne, 2000, p. 33). According to the International Monetary Fund's (IMF) World Economic Outlook, the combined nominal GDP of the G7 in 2023 was estimated at $45 trillion, while global GDP was about $104 trillion. This brings the G7's share to about 43 per cent of the world's total nominal GDP (IMF, 2024). As of 2023, the total exports of products from G7 countries amounted to $6,844,219,136, while the corresponding figure for all countries globally reached $23,651,975,102. These data indicate that the export volume from G7 countries constitutes approximately 29% of the total world export volume (TradeMap, 2024). These data illustrating the economic dominance of the G7 countries at the global level are undoubtedly indicative of a systematic and non-coincidental phenomenon. The support provided by these countries in areas such as education, research and development, innovation, and entrepreneurship has facilitated their attainment of a more elevated economic status in comparison to other nations. In addition to these factors, one of the primary indicators is unequivocally the volume of patent applications that safeguard the inventions of individuals or organizations. The number of patent applications serves as a significant indicator for these countries in sustaining their economic superiority, reflecting the tangible outcomes of their investments in education, research and development, innovation, and entrepreneurship. In light of the information presented regarding the significance of the concept of patents and the G7 countries so far, this study seeks to analyse the performance of G7 nations in relation to the volume of patent applications submitted. The ranking of the G7 countries - comprising Canada, France, Germany, Italy, Japan, the United Kingdom, and the United States - is determined by considering the total number of applications submitted to EPO, WIPO and USPTO during the 21-year period from 2000 to 2020 and by referring 9 different technology domains described by the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Therefore, this study is handled as a multi-criteria decision-making problem (MCDM), where the G7 countries serve as alternatives and the OECD technology domains are employed as criteria. The weights of OECD technology domains were determined separately by three different objective criteria weighting methods consisting of MaxC, MPSI and LOPCOW. The results obtained from these methods were subsequently integrated through the Bonferroni Mean Operator, resulting in a consensus solution. In addition, the performance rankings of G7 countries with respect to patents were established utilizing the MUTRISS method. Finally, three sensitivity analyses were conducted to assess the reliability of the results obtained from the MUTRISS method. In the Introduction section of the study, a detailed explanation regarding the significance of the patent concept and its relevance to the G7 countries is provided. The methodologies utilized in the study are delineated comprehensively in the second section, while the implementation phase, which includes the determination of criteria weights, the ranking of alternatives, and the sensitivity analysis, is discussed in the third section. In the fourth and fifth section of the study, results and discussion about the findings are presented.

2. Materials and Methods

This study aims to evaluate the performance rankings of G7 countries in terms of patent applications by analysing the total number of applications submitted to the EPO, WIPO, and USPTO from 2000 to 2020. The data that underpin the analysis were sourced from the OECD (2024) database. Canada, France, Germany, Italy, Japan, the United Kingdom, and the United States, which are among the G7 countries, were included as alternatives in this multi-criteria decision-making problem. On the other hand, patent applications submitted within the designated OECD technology domains—namely Biotechnology $(BT)(C_1)$, Information and Communication Technologies $(ICT)(C_2)$, Nanotechnology $(NT)(C_3)$, Technologies Related to Artificial Intelligence $(TRAI)(C_4)$, Medical Technology $(MT)(C_5)$, Pharmaceuticals $(PHR)(C_6)$, Environmental Technologies $(ENV)(C_7)$, Climate Change Adaptation Technologies $(CCAT)(C_8)$, and the Sustainable Ocean Economy $(SOE)(C_9)$—were evaluated as benefit oriented criteria. Introduced in 2024 by Gligorić et al. (2024) the MaxC method is an objective criterion weighting approach that aims to identify the maximum criteria values in the initial decision matrix. The prominent features of the method are that it does not require complex mathematical operations, is easy and comprehensible while providing consistent and reliable results. The MPSI approach, derived by the modification applied to the Preference Selection Index (PSI) method (Maniya and Bhatt, 2010), was introduced to the literature in 2022 by Gligoric et al. (2022). This objective criteria weighting method, which is not time-consuming and includes simple and straightforward calculation steps, takes into account the Euclidean distance unlike the MaxC method. On the other hand, introduced in 2022 by Ecer

and Pamucar (Ecer and Pamucar, 2022), the objective LOPCOW method addresses the gap caused by data size, produces more reasonable weights and enables the use of positive and negative values in the same decision matrix. Since it would not be an appropriate approach to assess the significance level of OECD technology domains based on personal judgments which require the application of subjective methods, and due to their aforementioned strengths, these three objective criteria weighting methods were favoured. In order to consolidate the results obtained from these three methods, Bonferroni Mean Operator (Bonferroni, 1950) was employed.

Introduced in 2023 by Zakeri et al. (Zakeri et al., 2023), the MUTRISS method is an approach based on the area calculation of irregular polygons consisting of multiple triangles that arise after normalisation. The polygon with the largest area among them is considered as the best alternative. This method, which is relatively recent and has not been widely implemented across numerous applications, offers significant convenience to researchers in terms of evaluation by visually representing the areas of polygons. In the last stage of the study, three sensitivity analysis were conducted to evaluate the stability of the ranking method including a comparative analysis conducted by utilizing five distinct traditional multi-criteria decision-making techniques. A comprehensive summary of all methods employed throughout the study is presented in Figure 1.

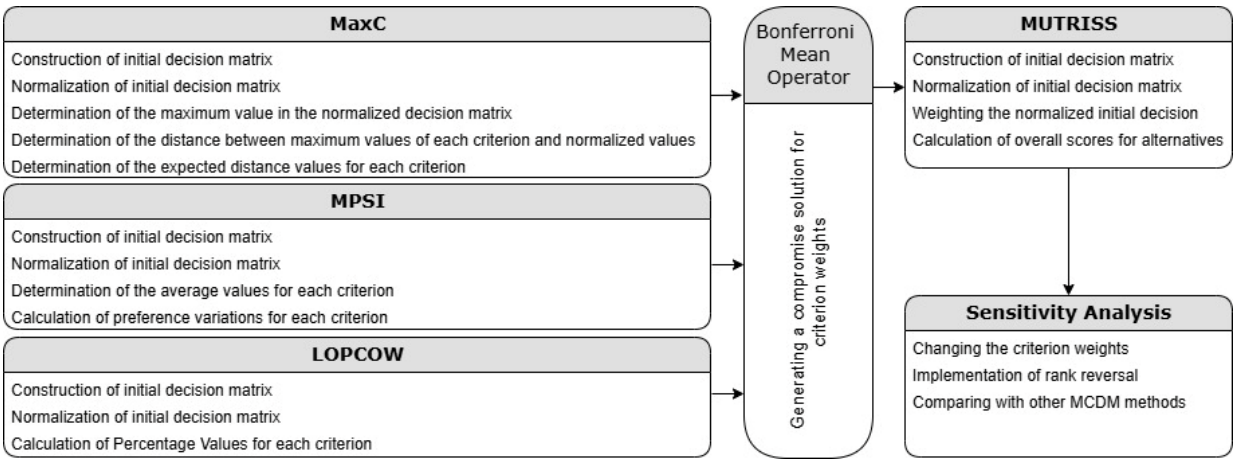


Figure 1. Flowchart of the research.

2.1. MaxC Method

Step 1: Construction of initial decision matrix.

The initial decision matrix is constructed by equation 1 where m represents the number of alternatives and n represents the number of criterion.

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Step 2: Normalization of initial decision matrix.

Initial decision matrix is normalized in linear form by equation 2.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} \quad (2)$$

Step 3: Determination of the maximum value in the normalized decision matrix.

The alternative with the highest normalized value under each criterion is determined using equation 3.

$$r_j^* = \max\left(r_{ij} | 1 \le j \le n|\right), \forall i \in [1, m] \quad (3)$$

Step 4: Determination of the distance between maximum values of each criterion and normalized values.

The distance of each value in the normalised matrix from the maximum value determined in the previous step is calculated using equation 4.

$$d_{ij} = r_j^* - r_{ij}, \forall i \in [1, m], \forall j \in [1, n] \quad (4)$$

Step 5: Determination of the expected distance values for each criterion.

The expected distance of each criterion is determined by averaging the distances determined in the previous step with equation 5.

$$E_j = \frac{\sum_{i=1}^{m} d_{ij}}{m}, \forall j \in [1, n] \quad (5)$$

Step 6: Calculation of criterion weights.

The final weights of the criteria are computed by equation 6.

$$\omega_j = \frac{E_j}{\sum_{j=1}^{n} E_j} \quad (6)$$

2.2. MPSI Method

Step 1: Construction of initial decision matrix.

The initial decision matrix is constructed by equation 7 where m represents the number of alternatives and n represents the number of criterion.

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Step 2: Normalization of initial decision matrix.

Initial decision matrix is normalized in linear form by equations 8 or 9 according to the type of criterion.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max\limits_{j} x_{ij}}; for\ benefit\ criterion \quad (8)$$

$$r_{ij} = \frac{\min_j x_{ij}}{x_{ij}}; for\ cost\ criterion \quad (9)$$

Step 3: Determination of the average values for each criterion.

The average values for each criterion in the normalized decision matrix is determined by equation 10.

$$\vartheta_j = \frac{\sum_{i=1}^{m} r_{ij}}{m}, \forall j \in [1,n] \quad (10)$$

Step 4: Calculation of preference variations for each criterion.

The preference variations for each criterion are calculated in the form of Euclidean distance by equation 11.

$$\mathcal{P}_j = \sum_{i=1}^{m} \left(r_{ij} - \vartheta_j\right)^2, \forall j \in [1,n] \quad (11)$$

Step 5: Calculation of criterion weights.

The final weights of the criteria are computed by equation 12.

$$\omega_j = \frac{\mathcal{P}_j}{\sum_{j=1}^{n} \mathcal{P}_j} \quad (12)$$

2.3. LOPCOW Method

Step 1: Construction of initial decision matrix.

The initial decision matrix is constructed by equation 13 where m represents the number of alternatives and n represents the number of criterion.

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Step 2: Normalization of initial decision matrix.

Initial decision matrix is normalized in linear form by equation 14 or 15 according to the type of criterion.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}}; for\ benefit\ criterion \quad (14)$$

$$r_{ij} = \frac{\max_j x_{ij} - x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}}; for\ cost\ criterion \quad (15)$$

Step 3: Calculation of percentage values for each criterion.

Calculation of Percentage Values for each criterion is realised by means of equation 16 where б represents standard deviation.

$$\mathcal{PV}_j = \left| \ln \left(\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} r_{ij}^2}{m}}}{б} \right) * 100 \right| \quad (16)$$

Step 4: Calculation of criterion weights.

The final weights of the criteria are computed by equation 17.

$$\omega_j = \frac{\mathcal{PV}_j}{\sum_{j=1}^{n} \mathcal{PV}_j} \quad (17)$$

2.4. Bonferroni Mean Operator

Bonferroni Mean Operator, which aims to generate a compromise solution for criterion weights obtained by different methods, is implemented by equation 18 (Bonferroni, 1950).

$$BM^{r,s}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left[\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i,j=1}^{n} x_i^r x_j^s \right]^{\frac{1}{r+s}}; \ i \neq j \quad (18)$$

The parameter n indicates the number of methods employed and $r \geq 0, s \geq 0$ represent the parameters of stabilization.

2.5. MUTRISS Method

Step 1: Construction of initial decision matrix.

The initial decision matrix is constructed by equation 19 where m represents the number of alternatives and n represents the number of criterion.

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Step 2: Normalization of initial decision matrix.

Initial decision matrix is normalized in linear form by equations 20 or 21 according to the type of criterion.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_j x_{ij}}; for\ benefit\ criterion \quad (20)$$

$$r_{ij} = \frac{\min_j x_{ij}}{x_{ij}}; for\ cost\ criterion \quad (21)$$

Step 3: Weighting the normalized initial decision matrix.

The normalized initial decision matrix is weighted by equation 22.

$$W_{ij} = \omega_j . r_{ij} \quad (22)$$

Step 4: Calculation of overall scores for alternatives.

The overall score of each alternative is calculated by equation 23 based on the area it occupies on its own polygon.

$$A_i = \left[\left(\sum_{j=1}^{n} W_{ij} * W_{i(j+1)} \right) + (W_1 * W_n) \right] * sin\left(\frac{360}{n} * 0{,}5\right); \ j+1 \leq n \quad (23)$$

The alternative with the greatest area will be assigned the primary position.

2.6. Sensitivity Analysis

The sensitivity analysis for the employed multi-criteria decision-making method was conducted utilizing equation 24 across 50 distinct scenarios, wherein the weight of the most significant criterion was systematically diminished by 1% and subsequently by 2% (Pamucar et al., 2021).

$$w_n : (1 - w_D) = w_n^* : (1 - w_D^*) \quad (24)$$

In the equation, w_D represents the original weight of the most dominant criterion, w_D^* denotes the adjusted weight of the most dominant criterion, w_n signifies the original weight of the nth criterion, and w_n^* indicates the adjusted weight of the nth criterion. The alternating order of G7

countries will be restructured based on the A_i values derived from each revised criterion weight.

Introducing new alternatives to the previously ranked options or producing new results by systematically eliminating alternatives from the bottom of the ranking, is another sensitivity analysis method acknowledged in the literature (Žižović et al., 2020).

In addition to the these sensitivity analysis conducted, a comparative analysis was performed utilizing the ranking results obtained from the ARAS (Zavadskas and Turskis, 2010), MAUT (Keeney et al., 1979), WEDBA (Rao et al., 2012), CODAS (Keshavarz-Ghorabaee et al., 2016), and EDAS (Ghorabaee et al., 2015) methods.

3. Results

The initial decision matrix for the MaxC, MPSI, and LOPCOW methods utilized in the criteria weighting, as well as the MUTRISS method employed in the ranking of alternatives, was established through Equations (1), (7), (13), and (19). The pertinent data pertaining to the G7 countries, considered as alternatives, alongside the OECD technology domains serving as criteria, are summarized in Table 1. Equations (1) through (17) were employed for the MaxC, MPSI, and LOPCOW objective criterion weighting methods, respectively. Table 2 presents the results of the criterion weights derived from these three methodologies. Exemplary calculations conducted during the implementation of these three objective criteria weighting methods are presented as follows.

Table 1. Initial decision matrix

	BT	ICT	NT	TRAI	MT	PHR	ENV	CCAT	SOE
Canada	20764	91942	2351	5526	20388	21464	30871	4111	877
France	31792	106557	4298	4030	28042	32327	60440	6090	1637
Germany	55290	198499	7229	9051	81200	55224	159813	12039	2166
Italy	10807	26583	1086	1064	16798	17389	23548	2541	617
Japan	75357	771955	24316	32737	116889	63009	286429	12216	3132
UK	33977	109550	3558	6491	37707	39171	45482	6279	1867
USA	426326	1643783	55448	111051	577736	424210	475457	70517	9864

Table 2. Results of the criterion weights derived from three methods

	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8	ω_9
MAXC	0.1273	0.1037	0.1054	0.1278	0.1288	0.1269	0.0742	0.1193	0.0867
MPSI	0.1098	0.1191	0.1168	0.1159	0.1117	0.1088	0.1161	0.1069	0.0949
LOPCOW	0.0799	0.1339	0.1277	0.0937	0.0697	0.0602	0.1917	0.0845	0.1586

MaxC Method:

$$r_{11} = \frac{20{,}764}{20{,}764 + \cdots + 426{,}326} = 0.0317$$

$$r_1^* = \max(0.0317, \ldots, 0.6516) = 0.6516$$

$$d_{11} = 0.6516 - 0.0317 = 0.6198$$

$$E_1 = \frac{0.6198 + \cdots + 0.000}{7} = 0.5087$$

$$\omega_1 = \frac{0.5087}{0.5087 + \cdots + 0.3465} = 0.1273$$

MPSI Method:

$$r_{11} = \frac{20{,}764}{426{,}326} = 0.0487$$

$$\vartheta_1 = \frac{0.0487 + \cdots + 1.000}{7} = 0.2193$$

$$\mathcal{P}_1 = (0.0487 - 0.2193)^2 + \cdots + (1.000 - 0.2193)^2 = 0.7265$$

$$\omega_1 = \frac{0.7265}{0.7265 + \cdots + 0.6275} = 0.1098$$

LOPCOW Method:

$$r_{11} = \frac{20{,}764 - 10{,}807}{426{,}326 - 10{,}807} = 0{,}0240$$

$$\mathcal{PV}_1 = \left| \ln\left(\frac{\sqrt{\frac{0.0240^2 + \cdots + 1.000^2}{7}}}{\sqrt{\frac{(0.0240 - 0.1989)^2 + \cdots . + (1.000 - 0.1989)^2}{7 - 1}}} \right) * 100 \right| = 7.7506$$

$$\omega_1 = \frac{7.7506}{7.7506 + \cdots + 15.3834} = 0.0799$$

Bonferroni Mean Operator:

Utilizing the Bonferroni Mean Operator, as delineated in equation 18), a compromise solution was derived from the results generated by all three objective criteria weighting methods as $\omega_1 = 0.1048$, $\omega_2 = 0.1186$, $\omega_3 = 0.1165$, $\omega_4 = 0.1120$, $\omega_5 = 0.1019$, $\omega_6 = 0.0966$, $\omega_7 = 0.1226$, $\omega_8 = 0.1031$ and $\omega_9 = 0.1111$.

An exemplary application of the Bonferroni Mean Operator for the first criterion is as follows;

$$\omega_1 = \left[\frac{1}{3(3-1)} . (0.1273 * 0.1098 + 0.1273 * 0.0799 + \cdots + 0.0799 * 0.1273 + 0.0799 * 0.1098 \right]^{\frac{1}{1+1}} = 0.1048$$

These compromised criterion weights obtained with

Bonferroni Mean Operator demonstrate that, although there is no significant difference among them, their order of importance is as $\omega_7 > \omega_2 > \omega_3 > \omega_4 > \omega_9 > \omega_1 > \omega_8 > \omega_5 > \omega_6$.

MUTRISS Method:

The initial decision matrix utilized during the weighting of criteria, as presented in Table 1, was employed similarly in the MUTRISS method for ranking the G7 countries. This initial decision matrix was normalized using equation 20, and subsequently weighted according to equation 22. In the final stage of the methodology, the overall score for each alternative presented in Table 3 was computed using equation 23.

Table 3. Overall scores and orders of G7 countries

Country	Overall Score	Order
Canada	0,0001055	6
France	0,0002521	5
Germany	0,0009210	3
Italy	0,0000378	7
Japan	0,0032781	2
UK	0,0002756	4
USA	0,0347445	1

Exemplary calculations performed at each step of the MUTRISS method utilized in the patent success rankings of G7 countries are presented as follows.

$$r_{11} = \frac{20{,}764}{426{,}326} = 0.0487$$

$$W_{11} = 0.1048 * 0.0487 = 0.0051$$

$$A_1 = [(0.0051 * 0.0066 + 0.0066 * 0.0049 + \cdots + 0.0060 * 0.0099) + (0.0051 * 0.0099)] * sin\left(\frac{360}{9} * 0{,}5\right) = 0.0001055$$

These overall score values represent the area of the resulting polygon for each G7 country, and the corresponding polygons are visualized as follows in Figure 2.

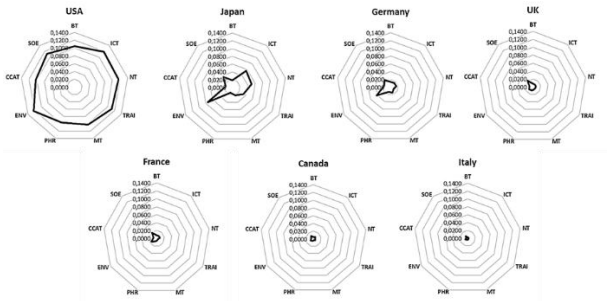


Figure 2. Areas of each polygons.

According to the results of the sorting operation carried out with the MUTRISS method, the success orders of G7 countries in terms of patent applications were emerged as the USA, Japan, Germany, the UK, France, Canada, and Italy.

The robustness of the ranking derived from the application of the MUTRISS method is corroborated by the sensitivity analysis conducted utilizing equation 24). In this methodology, the weight assigned to the criterion with the highest value was progressively diminished, while concurrently, the weights of the other criteria were correspondingly augmented. Criteria weights have been modified across fifty distinct scenarios, and this variation is illustrated in Figure 3.

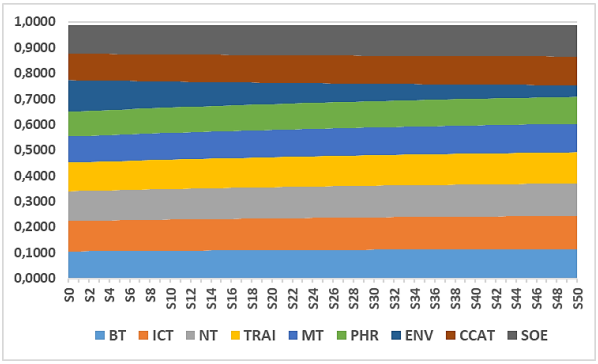


Figure 3. Observed changes in criterion weights.

In conjunction with the alteration in criterion weights, the observed changes in the ranking of G7 countries are illustrated in Figure 4.

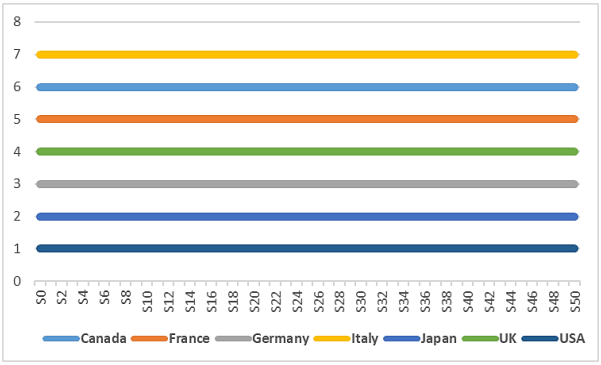


Figure 4. Observed changes in the order of G7 countries

Figure 4 illustates that the alterations in the criteria weights did not influence the ranking of the G7 countries. The newly derived rankings, which were obtained by sequentially excluding the lowest-performing countries from the alternatives, are illustrated in Figure 5.

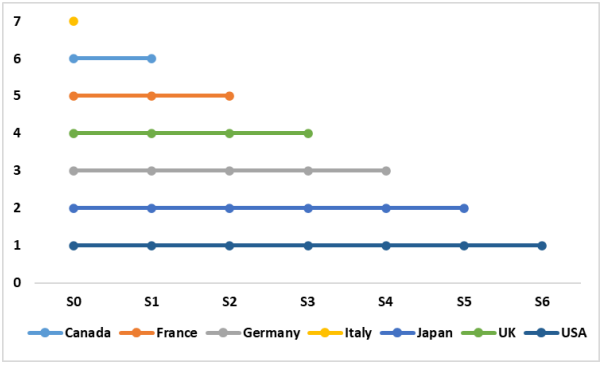


Figure 5. Resilience of the method to the rank reversal problem.

Figure 5 illustrates that the implemented method exhibits considerable resilience to the rank reversal problem. Furthermore, the analysis conducted using the ARAS,

MAUT, WEDBA, CODAS, and EDAS methods, by employing identical criteria weights, yielded results consistent with those obtained through the MUTRISS method. The results are illustrated in Figure 6.

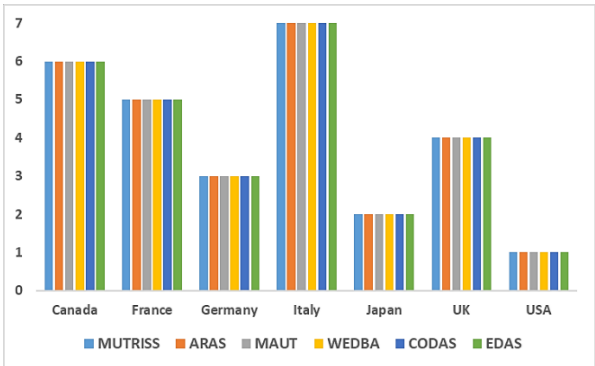


Figure 6. Comparison with other MCDM methods.

4. Discussion

In this research, the publications presented within the scope of the literature review, were analysed from two distinct perspectives: the analyses grounded in the patent data of G7 countries, and the methodological approaches employed in the study. To analyse and compare the civil remedies available for patent infringement across the G7 countries, Coury (2003) conducted a study that focused on injunctions, damages, descriptions and seizures, and criminal penalties. In their study, Archibugi and Filippetti (2010) offer significant insights regarding patent and broader intellectual property rights policies in G7 countries, cautioning against an excessive focus on intellectual property rights protection and underscoring the necessity for more comprehensive innovation and competitiveness policies. Investigating the dynamic relationship between the increase in the number of patents and GDP growth in G7 economies, Josheski and Koteski (2011) demonstrated a positive long-run association between quarterly increases in patents and quarterly GDP growth, employing the Autoregressive Distributed Lag (ARDL) model. By analysing the patent distributions in OECD countries, including the G7 nations, O'Neale and Hendy (2012) suggested that the distribution of patents generally adheres to a power law across nations, with variations that offer insights into the innovation ecosystems of each country. Kurt et al. (2018) conducted an analysis of the variables influencing patent output in G7 countries using panel data econometric techniques where the findings identified the key determinants as the share of R&D expenditures in GDP, GDP per capita, and the number of researchers, respectively. In their study, Çütçü and Bozan (2019) sought to ascertain the relationship between innovation and economic growth through panel data analysis, specifically examining Research and Development (R&D) expenditures and patent applications in G7 countries. The findings of their analyses indicated the presence of a long-run relationship between innovation and economic growth. Stolpe (2022) conducted a study advocating for the G7 countries to initiate patent buyouts as a means of ensuring equitable access to COVID-19 vaccines, both domestically and internationally among G7 nations. To investigate the relationship between innovation indicators and the international trade performance of G7 countries, Aktaş (2022) incorporated variables such as the number of patent applications in the analysis. A comprehensive summary of the literature regarding the methods employed in multi-criteria decision-making problems, which are also incorporated in this study, is presented in Table 4.

Table 4. Similar studies pertaining to the methodologies employed in this research

Method	Author	Subject
MaxC	Z. Gligorić et al. (2024)	Deep learning software selection
MPSI	M. Gligorić et al. (2022)	Support system selection
	Çelebi Demirarslan et al. (2024)	Ranking the quality of life indices by year in Asian countries
	Kara et al. (2024)	Benchmarking the supply chain performance of countries
	Biswas et al. (2024)	Comparing online shopping platforms
	Araujo et al. (2024)	Selection of SUV vehicles
	Torres et al. (2024)	Selection of unmanned aerial vehicle systems
LOPCOW	Ecer & Pamucar (2022)	Determination of corporate sustainability performances
	Rong et al. (2023)	Risk assessment of R&D projects
	Chatterjee et al. (2024)	Selection of collaborative robots
	Setiawansyah & Sulistiyawati (2024)	Selection of right tutor
	Dhruva et al. (2024)	Selection of suitable cloud vendors for health centre
	Sumanto et al. (2024)	Supplier selection in supply chain management
	Setiawan & Pasaribu (2024)	Selection of indoor working space
	Lukic (2024)	Performance positioning of trade in Serbia
	Pramuditya et al. (2024)	Selection of sports equipment suppliers
MUTRISS	Zakeri et al. (2023)	Material selection

While there exists a range of publications focusing on patent-related econometric analyses of G7 countries, the primary contribution of this study to the literature lies in the novel approach of addressing this issue as a multi-criteria decision-making problem for the first time. Furthermore, the establishment of consensus criteria weights through the integration of objective criteria weighting methods, including MaxC, MPSI, and LOPCOW, is regarded as a supplementary contribution. In future research, it is advisable to incorporate complementary indicators such as patent citation rates, R&D expenditures, the number of R&D personnel, and innovation outputs within specific sectors to enrich the analyses. Expanding the scope beyond the G7 countries to include emerging economies could yield a more comprehensive understanding of global innovation dynamics. The findings of this research offer meaningful observations regarding the G7 nations patent application performance, evaluated through the MUTRISS approach. The analysis revealed the success order of the G7 nations as follows: the USA, Japan, Germany, the UK, France, Canada, and Italy. The discrepancies in innovation capabilities, research and development funding, and intellectual property generation among the leading economies are underscored by this ranking. The dominant position of the United States in the ranking underscores its robust innovation ecosystem, which is bolstered by substantial investments in R&D activities, highly skilled labour force, and well-established legal and financial frameworks for patent protection. Similarly, Japan's second-place ranking reflects its strong emphasis on technological advancements, particularly in fields such as electronics, robotics, and automotive engineering. Germany, ranking third, exemplifies the strength of its industrial base and commitment to engineering excellence, particularly in sectors such as machinery and automotive technologies.

On the other hand, nations such as the United Kingdom and France, despite their commendable performance, are somewhat eclipsed by the leading three countries. Their rankings may be indicative of divergent national priorities, including an emphasis on service-oriented economies or other domains of innovation that are not entirely encapsulated by patent application metrics. In contrast, Canada and Italy, situated in the lower rankings, may have encountered challenges such as constrained research and development budgets, reduced rates of industrial innovation, or obstacles in translating research outputs into intellectual property. Therefore, strategies aimed at enhancing investment in R&D activities, fostering collaboration between universities and industry, and providing incentives for businesses to innovate may significantly contribute to increasing patent outputs. Furthermore, improving access to funding for start-ups and small enterprises, streamlining the patent application process, and investing in education and training programs to cultivate a skilled workforce in critical innovation sectors represent additional effective approaches. By implementing these targeted initiatives, policymakers can endeavour to strengthen their nations' innovation ecosystems, thereby driving economic growth and enhancing global competitiveness. While the MUTRISS method offers a comprehensive framework for ranking G7 countries, it is crucial to acknowledge the limitations inherent in this study. The dependence on patent application data exclusively may result in the oversight of other significant dimensions of innovation, including quality, commercialization success, and socio-economic impact. Furthermore, external factors such as global economic fluctuations, trade policies, and cultural attitudes toward innovation may affect patent activity which are not encompassed within the scope of this analysis.

5. Conclusion

This study contributes to the understanding of comparative patent performance, providing valuable insights for policymakers and stakeholders seeking to strengthen national innovation ecosystems. The findings highlight the varying degrees of innovation efficiency among G7 nations, suggesting that policy interventions tailored to enhancing patent quality, fostering R&D collaboration, and improving technology transfer could assist lower-ranked countries in bridging the gap. Furthermore, the study underscores the role of patents as a critical driver of technological advancement and economic competitiveness.

Author Contributions

The percentages of the author' contributions are presented below. The author reviewed and approved the final version of the manuscript.

	S.D.
C	100
D	100
S	100
DCP	100
DAI	100
L	100
W	100
CR	100
SR	100
PM	100
FA	100

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans.

References

African Regional Intellectual Property Organization. 2024. ARIPO. https://www.aripo.org/ (accessed date: Decemeber 26, 2023).

Aktaş N, 2022. G7 ülkelerinin inovasyon göstergelerinin değerlendirilmesi. EUJMR, 6(10): 87-104.

Araujo TMP de C, Dos Santos M, Gomes CFS, Azevedo CM, Vanzetta M, Pereira EL, 2024. Proposal of a Python Streamlit APP for the MPSI-MARA multicriteria method. 5th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI), 18-19 January, Lalitpur, Nepal, pp: 189-194.

Archibugi D, Filippetti A, 2010. The globalisation of intellectual property rights: Four learned lessons and four theses. Glob Policy, 1(2): 137-149.

Bayne N, 2000. Hanging in there: The G7 and G8 summit in maturity and renewal. Ashgate Pub Ltd, London, UK, pp:124.

Biswas S, Biswas B, Mitra K, 2024. A novel group decision making model to compare online shopping platforms. SDMA, 2(1): 1-27.

Bonferroni C, 1950. Sulle medie multiple di potenze. Boll Unione Mat Ital, 5(3-4): 267-270.

Çelebi Demirarslan P, Sönmez Çakır F, Akansel I, 2024. Ranking the quality of life indexes by years in Asian countries using multi-criteria decision-making methods. Asia-Pac J Reg Sci, 8(3): 911-942.

Chatterjee S, Das PP, Chakraborty S, 2024. An LOPCOW-OPTBIAS-based integrated approach for cobot selection in manufacturing assembly operations. Int J Multicrit Decis Mak, 10(1): 47-69.

Coury L, 2003. C'est what-saisie: A comparison of patent infringement remedies among the G7 economic nations. Fordham Intell Prop Media Ent Law J, 13(4): 1101.

Çütçü İ, Bozan T, 2019. İnovasyon ve ekonomik büyüme ilişkisi: G7 ülkeleri üzerine panel veri analizi. Ulus Ekon İşletme Polit Derg, 3(2): 289-310.

Dhruva S, Krishankumar R, Zavadskas EK, Ravichandran KS, Gandomi AH, 2024. Selection of suitable cloud vendors for health centre: A personalized decision framework with Fermatean fuzzy set, LOPCOW, and CoCoSo. Informatica, 35(1): 65-9.8.

Ecer F, Pamucar D, 2022. A novel LOPCOW-DOBI multi-criteria sustainability performance assessment methodology: An application in developing country banking sector. Omega, 112: 102690.

European Patent Office. 2024. EPO. https://www.epo.org/ (accessed date: Decemeber 26, 2023).

Ghorabaee MK, Zavadskas EK, Olfat L, Turskis Z, 2015. Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS). Informatica, 26(3): 435-451.

Gligorić M, Gligorić Z, Lutovac S, Negovanović M, Langović Z, 2022. Novel hybrid MPSI-MARA decision-making model for support system selection in an underground mine. Syst, 10(6): 248.

Gligorić Z, Görçün ÖF, Gligorić M, Pamucar D, Simic V, Küçükönder H, 2024. Evaluating the deep learning software tools for large-scale enterprises using a novel TODIFFA-MCDM framework. J King Saud Univ Comput Inf Sci, 36(5): 102079.

Granstrand O, 1999. The economics and management of intellectual property. Edward Elgar Publ, Cheltenham, UKi pp: 154.

Gulf Cooperation Council Patent Office. 2024. GCCPO. https://www.gccpo.org/ (accessed date: Decemeber 26, 2023).

Hall BH, Harhoff D, 2012. Recent research on the economics of patents. Annu Rev Econ, 4: 541-565.

International Monetary Fund. 2024. IMF. https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues (accessed date: Decemeber 26, 2023).

Josheski D, Koteski C, 2011. The causal relationship between patent growth and growth of GDP with quarterly data in the G7 countries: Cointegration, ARDL and error correction models. IO: Product, Cheltenham, U.K., pp: 56.

Kara K, Yalçın GC, Simic V, Baysal Z, Pamucar D, 2024. The alternative ranking using two-step logarithmic normalization method for benchmarking the supply chain performance of countries. Socio-Econ Plan Sci, 92: 101822.

Keeney R, Raiffa H, Rajala D, 1979. Decisions with multiple objectives: Preferences and value trade-offs. IEEE Trans Syst Man Cybern, 9: 403-403.

Keshavarz-Ghorabaee M, Zavadskas E, Turskis Z, Antucheviciene J, 2016. A new combinative distance-based assessment (CODAS) method for multi-criteria decision-making. Econ Comput Econ Cybern Stud Res, 50(3): 25-44.

Kurt S, Sezgin F, Sart G, 2018. G7 ülkelerinde patent üretimini etkileyen değişkenler için panel veri analizi. Yönetim Bilim Derg, 16(32): 285-298.

Lukic R, 2024. Research on the dynamics of the performance positioning of the trade in Serbia using the LOPCOW and EDAS methods. Appl Res Adm Sci, 5(1): 31-40.

Maniya K, Bhatt MG, 2010. A selection of material using a novel type decision-making method: Preference selection index method. Design Nanomat Nanostruct, 31(4): 1785-1789.

Maskus K, 2000. Intellectual property rights in the global economy. Peterson Inst Int Econ, Washington, USA, pp: 241.

OECD. 2024. OECD Data Explorer. https://data-explorer.oecd.org/ (accessed date: Decemeber 26, 2023).

O'Neale DRJ, Hendy SC, 2012. Power law distributions of patents as indicators of innovation. PLOS One, 7(12): e49501

Pamucar D, Zizovic M, Biswas S, Božanić D, 2021. A new logarithm methodology of additive weights (LMAW) for multi-criteria decision-making: Application in logistics. Facta Univ Ser Mech Eng, 19(3): 361-380.

Pramuditya A, Darwis D, Setiawansyah S, 2024. Kombinasi logarithmic percentage change-driven objective weighting dan complex proportional assessment dalam penentuan supplier perlengkapan olahraga. J Comput Syst Inform, 5(3): 660-669.

Putnam RD, Bayne N, 1984. Hanging together: The seven-power summits. Harvard Univ Press, Cambridge, USA, pp: 142.

Rao RV, Singh D, Bleicher F, Dorn C, 2012. Weighted Euclidean distance-based approach as a multiple attribute decision making method for manufacturing situations. Int J Multicrit Decis Mak, 2(3): 225-240.

Rong Y, Yu L, Liu Y, Simic V, Garg H, 2023. The FMEA model based on LOPCOW-ARAS methods with interval-valued Fermatean fuzzy information for risk assessment of R&D projects in industrial robot offline programming systems. Comput Appl Math, 43(1): 25.

Setiawan GD, Pasaribu AFO, 2024. Implementasi kombinasi LOPCOW dan operational competitiveness rating analysis dalam rekomendasi tempat wisata indoor. JUSTINDO, 9(2): 109-120.

Setiawansyah S, Sulistiyawati A, 2024. Penerapan metode logarithmic percentage change-driven objective weighting dan multi-attribute utility theory dalam penerimaan guru bahasa İngiliz. J Artif Intell Technol Inf, 2(2): 62-75.

Stolpe M, 2022. How the G7 can use patent buyouts to help the world win the race against coronavirus mutations. The Glob

Solut Initiat, Berlin, Germany, pp: 45.

Sumanto S, Sumarna H, Nurdin T, Asra IA, Sobari H, Kuswanto I, Chaidir I, Akil F, Handono W, 2024. Improved LOPCOW-SAW method for optimal supplier selection in supply chain management. 12th International Conference on Cyber and IT Service Management, 3-4 October, Batam, Indonesia, pp: 1-5.

Torres PS, Gomes CFS, Santos M dos, 2024. Selection of unmanned aerial vehicle systems for border monitoring using the MPSI-SPOTIS method. J Def Anal Logist, 8(1): 80-104.

Trade Statistics for International Business Development. 2024. TradeMap, URL: www.intracen.org (accessed date: Decemeber 26, 2023).

TURKPATENT. 2024. Turkish patent and trademark office. URL: www.turkpatent.gov.tr (accessed date: Decemeber 26, 2023).

WIPO, 2016. Understanding industrial property. World Intellect Prop Organ, URL: www.wipo.int (accessed date: Decemeber 26, 2023).

Zakeri S, Chatterjee P, Cheikhrouhou N, Konstantas D, Yang Y, 2023. MUTRISS: A new method for material selection problems using multiple-triangles scenarios. Expert Syst Appl, 228: 120463.

Zavadskas EK, Turskis Z, 2010. A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making. Technol Econ Dev Econ, 16(2): Article 2.

Žižović M, Pamučar D, Albijanić M, Chatterjee P, Pribićević I, 2020. Eliminating rank reversal problem using a new multi-attribute model—The RAFSI method. Math, 8(6): 1-16.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1603629

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 757-774/ May 2025

TECHNOLOGICAL ADVANCES IN AEC: AI, MACHINE LEARNING, BIM, AND THE FUTURE OF SUSTAINABLE BUILDING DESIGN IN A POST-PANDEMIC WORLD

Aslıhan ŞENEL SOLMAZ[1]*

[1]*Dokuz Eylül University, Faculty of Architecture, Department of Architecture, 35160, İzmir, Türkiye*

Abstract: The Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry has experienced a profound transformation, accelerated by the COVID-19 pandemic, which underscored the need for digital solutions to enhance sustainability and resilience. Despite existing technological advancements, the pandemic revealed gaps in the widespread adoption of tools like Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), Building Information Modeling (BIM), Internet of Things (IoT), and Digital Twins (DT). This study addresses the critical question of how these technologies have reshaped building design, construction, and operation processes to meet sustainability goals in the post-pandemic era. A systematic literature review of 35 peer-reviewed studies published between 2019 and 2024 was conducted to analyze the impact of key digital technologies on sustainable building practices. The research employed a thematic analysis focusing on technological advancements, sustainability applications, challenges and barriers, and emerging trends such as smart cities, renewable energy integration, and circular economy principles. The findings reveal that technologies like AI and DTs play a pivotal role in enhancing energy efficiency, enabling predictive maintenance, and improving lifecycle resource management. However, barriers such as interoperability issues, high implementation costs, and data security concerns persist, hindering widespread adoption. The study emphasizes the growing trend toward data-driven sustainability and the need to address these challenges through collaborative frameworks and technological innovation. In conclusion, this research highlights the transformative potential of digital technologies in advancing sustainability and resilience within the AEC industry. By bridging the gap between technological innovation and sustainable development goals, this study provides actionable insights for overcoming existing barriers and fostering adaptive, energy-efficient, and environmentally responsible built environments in a post-pandemic world.

Keywords: Digital technologies, Sustainable building design, Post-pandemic AEC industry, Artificial intelligence, Building information modeling, Digital twins

***Corresponding author:** Dokuz Eylül University, Faculty of Architecture, Department of Architecture, 35160 , İzmir, Türkiye
E mail: aslihan.senel@deu.edu.tr (A. ŞENEL SOLMAZ)
Aslıhan ŞENEL SOLMAZ https://orcid.org/0000-0002-1018-4769

Received: December 18, 2024
Accepted: March 26, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Şenel Solmaz A. 2025. Technological advances in AEC: AI, machine learning, BIM, and the future of sustainable building design in a post-pandemic world. BSJ Eng Sci, 8(3): 757-774.

1. Introduction

The COVID-19 pandemic triggered unprecedented challenges globally, profoundly impacting industries such as Architecture, Engineering, and Construction (AEC). Beyond its health implications, the pandemic caused widespread economic disruption, delaying projects, exacerbating material and labor shortages, and mandating stringent health precautions. These disruptions underscored the vulnerabilities of traditional AEC practices and accelerated the adoption of digital technologies to ensure business continuity, efficiency, and safety in a rapidly changing environment (Yap et. al., 2019; Wang et al., 2021; Elrefaey et. al., 2022).

Before the pandemic, technologies such as Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), Building Information Modeling (BIM), and Internet of Things (IoT)-enabled systems were gradually being integrated into AEC processes. However, the urgency for remote planning, virtual collaboration, and adaptive project management during the pandemic transformed these technologies from optional tools to essential solutions (Magahed et. al., 2022; Alizadehsalehi et. al., 2020). Emerging innovations like Digital Twins (DTs), Augmented/Virtual Reality (AR/VR), and blockchain further enhanced real-time decision-making, predictive maintenance, and resource efficiency, paving the way for smarter and more resilient built environments.

While these technologies have been widely discussed, their transformative role in achieving sustainability goals during and after the pandemic remains underexplored. According to Elrefael et al. (2022), pre-pandemic digital technology investments often fell short due to underutilization and inadequate integration strategies. The crisis has since emphasized the critical need for evaluating digital tool adoption to support sustainable, efficient, and resilient buildings.

This study aims to address this gap by examining how the post-pandemic acceleration of digital technologies—specifically AI, ML, BIM, IoT, and DTs—is shaping sustainable building design, construction, and operation across the building lifecycle. Using a systematic literature review of 35 peer-reviewed studies (2019–2024), the research identifies:

- The applications of these technologies in energy

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

efficiency, lifecycle optimization, and resource management,
- The barriers to widespread adoption, such as interoperability, implementation costs, and data security concerns, and
- The emerging trends driving sustainability, such as smart cities, renewable energy integration, and circular economy principles.

By addressing these aspects, this paper offers new insights into the convergence of digital transformation and sustainability imperatives, highlighting the critical role of technology in fostering adaptive, efficient, and resilient built environments. The study's findings contribute to filling a research gap by providing actionable strategies for leveraging digital innovations to meet post-pandemic challenges and long-term sustainability goals in the AEC industry.

2. Literature Review

The COVID-19 pandemic brought unprecedented challenges, profoundly affecting global societies and economies while exposing vulnerabilities in the built environment (Elavarasan and Pugazhendhi, 2020). In densely populated areas, the heightened risk of pathogen exposure highlighted the critical need for infection control measures that extend beyond healthcare facilities. Measures such as improved ventilation, quarantine, social distancing, and disinfection became essential to mitigating cross-infection risks, which not only impacted health but also contributed to psychological stress and economic instability (Morawska et. al., 2020; Magahed and Ghoneim, 2021; Amoatey et. al., 2020; Shakil et. al., 2020). This experience underscored the importance of creating resilient, adaptable, and health-focused spaces capable of addressing both immediate public health needs and long-term sustainability goals (Coraglia et. al., 2024).

The pandemic also accelerated discussions in academia and industry, focusing on well-being within built environments (Mouratidis et. al., 2022; Gurram et. al., 2022), the need for resilient urban systems (Banai, 2020), and the integration of pandemic readiness into building design (Cheshmehzangi, 2021). Research has emphasized that the disruption caused by COVID-19 offers a critical juncture to reassess how sustainability is approached in the built environment, specifically advocating for a paradigm shift toward resilience and occupant health as central to future urban design (Coraglia et. al., 2024). While these discussions generated valuable insights, long construction cycles and reliance on traditional design approaches limited the development of practical, evidence-based guidelines. This gap highlights the urgency of rethinking building practices to prioritize adaptability, resource efficiency, and occupant health in the post-pandemic era (Han et. al. 2022).

Digital transformation has become a powerful driver of change, fundamentally reshaping how industries approach sustainability (Megahed and Ghoneim, 2020). The Digital Revolution—spanning technologies such as AI, IoT, and automated decision-making systems—has enabled the AEC industry to adopt greener, more resource-efficient practices, enhancing energy efficiency and reducing environmental impacts across the building lifecycle (Nakicenovic et. at.,2019; Aniekan Akpan et. al., 2024). Among these, DTs have emerged as a transformative tool, offering capabilities such as real-time monitoring, predictive maintenance, and disaster management (Megahed and Hassan, 2022). The pandemic accelerated the need for smart building technologies that support adaptive energy management and efficient resource use, emphasizing energy-saving measures and building retrofitting as essential components of sustainable recovery (Gorina et. al., 2024). By integrating IoT and AI, DTs support data-driven decision-making and scenario simulations, enabling improved energy performance and optimized resource use while mitigating future disruptions (Martínez-Cuevas et. al., 2024). These innovations not only address immediate pandemic-related challenges but also contribute to the broader sustainability goals of creating urban environments that are resilient, adaptive, and aligned with long-term environmental priorities (Megahed and Hassan, 2022; Martínez-Cuevas et. al., 2024).

Moreover, the pandemic's impact on residential buildings has highlighted an urgent need to transform sustainability requirements for these spaces. Research suggests that COVID-19 experience is reshaping how we think about residential building sustainability, emphasizing the integration of health-oriented features and increased energy efficiency in design (Tokazhanov et. al., 2020). Additionally, the global crisis has prompted a re-evaluation of building energy consumption patterns, highlighting that post-pandemic energy demands differ significantly from pre-pandemic trends. As many offices transitioned to remote work, energy usage in residential buildings surged, indicating the need for more energy-efficient home environments (Jogunola et. al., 2022). The integration of digital tools has become a transformative force in advancing sustainable practices across the AEC industry. These technologies such as BIM, IoT, and DTs are revolutionizing design, construction, and operational processes by enabling energy modeling, real-time monitoring, and predictive maintenance. By harnessing these capabilities, the AEC industry can achieve significant reductions in energy consumption, minimize environmental footprints, and extend the lifecycle efficiency of buildings. Digital technologies not only streamline resource management but also empower stakeholders with data-driven insights to create resilient and adaptable structures. As the backbone of sustainable innovation in AEC, digitalization addresses the complex challenges of modern construction while setting new standards for environmental responsibility. The following section explores key technological

advancements including AI, BIM, IoT, and other emerging tools and highlights their vital contributions to sustainable building design and operation.

2.1. Technological Advancements Supporting Sustainable Building Design

The integration of digital technologies such as AI, ML, DTs, and the IoT is significantly transforming sustainable building design. These technologies enhance efficiency, reduce environmental impacts, and enable optimized resource utilization by creating a seamless connection between the physical and digital realms. AI and ML contribute significantly to predictive maintenance, energy modeling, and the analysis of complex datasets, allowing for smarter decision-making and reduced waste. Meanwhile, IoT employs smart sensors and automated controls to dynamically adapt building systems to changing conditions, improving energy efficiency and occupant comfort (Adewale et. al., 2024; Zhou and Liu 2024). DTs act as comprehensive virtual representations of physical assets, offering capabilities such as real-time monitoring, lifecycle optimization, and advanced simulations. These tools play a pivotal role in enhancing energy performance, promoting renewable energy integration, and achieving net-zero carbon objectives by providing actionable insights to minimize carbon footprints. Moreover, DTs improve indoor environmental quality, ensuring healthier and more sustainable living and working conditions (Megahed and Hassan, 2022; Martínez-Cuevas et. al., 2024; Zhou and Liu 2024). BIM complements these advancements by streamlining workflows, minimizing material waste, and enabling lifecycle analyses for resource-efficient construction projects. When combined with IoT, BIM facilitates dynamic modeling and real-time decision-making, while AI-driven systems deliver advanced simulations for energy optimization and adaptive resource management. Collectively, these technologies support human-centered and environmentally sustainable building designs, paving the way for resilient urban environments (Adewale et. al., 2024; Zhou and Liu 2024).

Beyond their role in construction, these digital technologies are driving innovation in energy systems, particularly in smart cities. By incorporating big data analytics, blockchain for secure energy transactions, and IoT-enabled energy networks, they enable effective planning, control, and optimization of energy systems. These innovations support the transition to renewable energy sources and energy-efficient buildings, establishing a foundation for sustainable urban development. However, challenges such as high implementation costs, interoperability issues, and data security concerns continue to hinder their widespread adoption, highlighting the need for further research and collaboration (Zhou and Liu 2024). Recent studies underscore the transformative potential of digital technologies in advancing sustainable building practices and smart city development. For instance, Adewale et al. (2024) explored the application of AI, ML, DTs, and IoT to reduce carbon footprints, optimize energy efficiency, and minimize waste across the building lifecycle. Key findings emphasized the role of AI in predictive maintenance and design optimization, IoT for automating building system controls, and DTs for real-time monitoring and lifecycle management. However, these advancements are hindered by barriers such as high implementation costs, data security, and gaps in technical expertise. Building on these insights, Bibri et al., (2024) highlighted the integration of AI, ML, and DTs into sustainable building design and smart city frameworks. This study showcased the synergy between AI and IoT for dynamic, data-driven management systems, enabling enhanced energy efficiency, reduced operational costs, and improved occupant comfort. To address interoperability and data security challenges, the authors recommended standardized frameworks and advanced algorithms to improve system scalability and reliability. Oulefki et al. (2024) further examined AI-driven advancements within DTs to optimize building operations and enhance sustainability in smart buildings. Their research focused on predictive maintenance, anomaly detection, and real-time optimization while emphasizing the integration of renewable energy sources. Promising future directions included leveraging generative AI for scenario modeling and addressing scalability challenges with quantum computing. Despite these innovations, issues like data privacy, standardization, and fault detection systems remain unresolved. In a broader exploration, Ferdaus et al. (2024) analyzed the role of AI, ML, DTs, IoT, robotics, and blockchain in driving the energy sector toward net-zero emissions. Their research identified applications such as AI and ML for energy optimization, DTs for real-time system management, and IoT for intelligent energy controls. Ethical considerations, including transparency and security, were emphasized as critical for responsible implementation. However, gaps in standardization and scalability were noted as key areas for interdisciplinary collaboration. Similarly, Arsecularatne et al. (2024) investigated the transformative impact of DTs, AI, ML, and IoT on energy efficiency, sustainability, and operational performance in smart buildings. This study highlighted the integration of these advanced technologies with BIM and Industry 4.0 concepts to tackle challenges in the AEC. Renganayagalu et al. (2024) focused on the integration of digital technologies within the framework of sustainable building design. Their research demonstrated the role of DTs, AI, ML, and IoT in optimizing energy performance and promoting sustainability across building systems, reinforcing the importance of technology in achieving long-term environmental goals.

The transformative impact of digital technologies on sustainable building design is evident through their diverse applications in energy management, lifecycle optimization, and operational efficiency. Each of these technologies—AI, ML, BIM, IoT, and DTs—offers distinct contributions, addressing unique challenges while

complementing one another in fostering resilient and environmentally conscious building practices. By enabling predictive analytics, smart automation, and data-driven decision-making, these advancements align with the AEC industry's goals of reducing carbon footprints, enhancing resource efficiency, and creating adaptive structures. The following subsections delve into the key technological advancements that are redefining sustainable building design, emphasizing their unique roles, practical applications, and potential to drive the transition toward a more sustainable and resilient built environment.

2.2 Implementation of Digital Technologies Beyond the Pandemic

The COVID-19 pandemic accelerated the adoption of digital sustainability practices within the AEC industry, emphasizing resilience, remote capabilities, and comprehensive sustainability goals. Technologies such as IoT, BIM, digital twins, robotics, and AI-driven analytics were rapidly integrated to ensure operational continuity and sustainability. Technologies such as IoT, BIM, digital twins, and robotics have been increasingly integrated into building processes to ensure operational continuity and sustainability goals during and after the pandemic (Royan 2021). BIM evolved significantly from visualization to a critical tool for sustainability and circular economy, digitally documenting building components to create resource banks for material reuse, thus reducing reliance on scarce resources. According to Royan (2021), enhanced digital solutions are significantly driving CO_2 mitigation, climate adaptation, and digital-driven circular economy approaches, emphasizing resource-efficient reuse from the design phase.

The study by Parracho et al. (2025) highlights the significant post-pandemic shift toward modular and prefabricated construction, enabled by integrating BIM, DTs, IoT, and AI. These digitally-driven methods optimize carbon footprints, operational energy use, and material circularity. Post-pandemic digital transformation in the buildings has significantly enhanced sustainability and efficiency, with digital technologies such as AI, BIM, IoT, and smart meters enabling up to 30–50% improvement in building energy intensity by 2040. This adoption has primarily been driven by the need for improved indoor environmental quality, energy management, and operational resilience (Asif et. al. 2024). Furthermore, advanced AI-powered energy modeling and life cycle assessment (LCA) tools support the industry's movement towards off-grid, smart, and climate-responsive modular buildings.

The COVID-19 pandemic accelerated the adoption of digital technologies like BIM, remote collaboration tools, and advanced resource management systems in the construction industry. These technologies effectively mitigated disruptions caused by workforce shortages, logistical constraints, and material unavailability, reinforcing their essential role in enhancing project resilience and performance during crises (Pamidimukkala et al. 2025).

Piras et al. (2024) forecast that by 2025, DT-enabled smart building solutions will become prevalent, emphasizing real-time monitoring, automation, and predictive analytics. Yang et. al. (2022) further underline the importance of VR-enhanced training and AI-powered simulations to improve workforce efficiency and sustainability outcomes in modular construction. Pham et al. (2025) indicate that a significant post-pandemic transformation has been the integration of BIM with immersive technologies like VR and AR. These immersive solutions support collaborative design, interactive safety training, remote project management, and AI-driven hazard simulations, significantly addressing pandemic-induced constraints.

Moreover, the COVID-19 pandemic acted as a catalyst for digital transformation within construction tendering processes, significantly promoting electronic tendering (E-Tendering). However, the widespread adoption of this technology faced considerable barriers such as inadequate ICT infrastructure, data security concerns, high implementation costs, and resistance to change, highlighting the necessity for strategic interventions to overcome these challenges (Inusah et al., 2025). Integrated E-Tendering platforms leveraging BIM, AI, and DTs enhance decision-making, reduce paperwork, and increase transparency, though barriers such as cybersecurity risks, interoperability issues, resistance to AI-driven decision-making, and high investment costs persist. The construction industry's response to COVID-19 has underscored the critical role of digital and strategic resilience. The pandemic revealed significant vulnerabilities in traditional construction processes, prompting widespread adoption of digital technologies for project management, remote collaboration, and supply chain integration to mitigate disruptions and maintain operational continuity (Selcuk, 2025).

Chen et al. (2024) identify a key shift to fully integrated AI-DT ecosystems, making smart building management, predictive maintenance, and climate-responsive automation standard in energy-efficient construction. They also emphasize the necessity for policy-driven incentives to support digital adoption, particularly among SMEs. Emerging trends include AI and DT-driven monitoring, blockchain-based procurement, and AI-powered robotics and collaboration platforms, though cybersecurity risks, AI governance challenges, and the need for standardized frameworks remain.

Emerging digital ecosystems such as the Metaverse have shown potential to significantly transform the post-pandemic AEC by enhancing design simulation, stakeholder collaboration, and real-time performance assessment, particularly in the context of net-zero buildings. However, technological, infrastructural, and skill-based barriers continue to limit their broader adoption, necessitating strategic interventions from industry professionals and policymakers (Oguntona and Akinradewo 2025).

Despite significant benefits, digital technologies in the AEC raise critical concerns that require attention. Digital infrastructures, such as data centers and networks supporting AI, IoT, and DTs, entail considerable energy use, potentially exacerbating the carbon footprint rather than mitigating it. Additionally, ethical challenges, notably around data privacy, transparency, and ownership, become increasingly significant as reliance on automated decision-making grows. There is a critical need for stringent governance frameworks to ensure ethical AI practices. Moreover, excessive reliance on digital technologies might foster a risk of digital addiction, diminishing direct human interaction and potentially eroding traditional skills within the workforce, suggesting a need for balanced integration strategies that preserve essential human competencies and interactions.

A strategic approach toward post-pandemic AEC involves not only immediate technological adoption but also future-proofing buildings. As Wang et al. (2021) indicate, the extended construction cycle demands designing adaptable building systems that accommodate evolving technologies. Dynamic AI-driven, IoT-connected solutions are essential for enhancing building performance continuously and efficiently. Overall, the pandemic has been pivotal in advancing digitalization, placing digital technologies at the core of sustainability, resilience, and long-term adaptability in the AEC.

2.3. Artificial Intelligence and Machine Learning in AEC

The evolution of AI in the AEC industry has been extensively analyzed, with Darko et al. (2020) offering a scientometric review that traces historical and emerging research trends. Their study highlights the significant growth of AI research within the AEC industry over time, underscoring its increasing importance as AI, in combination with the IoT, enhances the industry's capacity to process complex, heterogeneous data. The authors use advanced techniques like co-citation and co-authorship analysis to map out the development of AI in the industry, offering valuable insights for future applications, especially in the integration of AI with other emerging technologies such as BIM and smart construction tools. Their research is particularly valuable for understanding how AI can shape future developments in smart building technologies, providing a solid foundation for further research in AI-powered sustainable building solutions.

Building on the broader role of AI, De Las Heras et al. (2020) delve into the integration of ML techniques, particularly in the context of smart cities, where urban growth and the COVID-19 pandemic have introduced new challenges. The study emphasizes the potential of ML to optimize sustainability by providing an inclusive framework for analyzing sustainability dimensions, applications, and tools. The authors propose the EARLY model as a future-oriented approach to enhance the sustainability and resilience of urban systems, supported by a case study in Andalusia. This contribution uniquely bridges the applicability of ML with Sustainable Development Goals (SDGs) in smart city contexts. Extending the discussion on AI and ML applications, Rathore et al. (2021) provide a comprehensive review of how these technologies, along with big data, contribute to the advancement of DTs. Their study focuses on both the challenges and opportunities associated with DT development, identifying key applications such as predictive maintenance and real-time data integration. By improving accuracy and predictive capabilities, AI and ML-driven DTs are positioned to enhance smart building performance significantly. The authors further emphasize the necessity of advanced machine learning algorithms to optimize these digital models, ensuring their functionality aligns with the evolving demands of sustainable and intelligent building systems.

Further reinforcing AI's transformative role in AEC, Rampini and Cecconi (2022) explore its applications in construction asset management, emphasizing both the challenges and opportunities in sustainability-driven innovation. Their review highlights how AI, when combined with emerging technologies such as DTs and Generative Adversarial Networks (GANs), can optimize asset management, reduce operational costs, and enhance building performance. By integrating AI with IoT, BIM, and other smart building technologies, they propose strategies for improving sustainability outcomes in construction and facility management. This research underscores the potential of AI-driven asset management to revolutionize the built environment, ensuring more efficient and resilient operations in the AEC.

Expanding on AI's role in shaping resilient urban environments, Strielkowski et al. (2022) examine how the COVID-19 pandemic underscored the need for adaptive, technology-driven urban management systems. Their study highlights the importance of integrating AI and IoT within smart cities to enhance resource management, public health strategies, and transportation systems, particularly during crises. The authors argue that the pandemic served as a catalyst for accelerating urban transformation, making cities more intelligent and resilient against future disruptions. In this context, they emphasize the potential of AI-driven governance models to improve real-time decision-making, providing a pathway for more sustainable and responsive urban development in the post-pandemic era.

As cities embrace AI-driven governance models to enhance urban resilience, the focus also shifts toward optimizing indoor environments through advanced digital technologies. Karatzas et al. (2024) present a comprehensive text-analytic framework that integrates DTs, ML, and AI to improve indoor building environmental performance. By leveraging AI and ML algorithms, the study processes large sets of environmental data to enhance energy efficiency, thermal comfort, and air quality in real-time. This integration is particularly valuable for exploring how AI and ML, in

synergy with DTs, can enable adaptive, occupant-focused strategies for sustainable building management. The findings contribute to the broader discourse on leveraging advanced technologies for smart and sustainable construction.

As digital technologies continue to enhance building performance, their integration with advanced learning techniques further refines energy optimization strategies. Villano et al. (2024) provides an extensive review of machine and deep learning techniques applied to building energy simulation, optimization, and management. A key contribution is its emphasis on the role of hybrid models that combine traditional simulation techniques with machine learning for improved accuracy in energy performance prediction. The authors highlight the increasing relevance of reinforcement learning and neural networks for dynamic energy management systems, paving the way for automated optimization in building operations. They also identify future directions, including the integration of real-time data from IoT devices into AI frameworks to enable adaptive and predictive energy systems.

2.4. BIM and Integrated Systems

As AI and machine learning continue to shape energy-efficient and adaptive building management, another pivotal technology, BIM, has also experienced accelerated adoption, particularly in response to global disruptions. Wang et al. (2021) examine how the COVID-19 pandemic disrupted traditional workflows and significantly influenced BIM adoption in China's AEC industry. Their study applies event system theory (EST) and innovation diffusion theory (IDT) to highlight the role of external shocks in reshaping technology adoption strategies. A key contribution of their research is the exploration of how crisis-induced cognitive shifts among AEC stakeholders have driven BIM implementation, ultimately enhancing resilience and efficiency across the industry.

While the pandemic served as a catalyst for BIM adoption in the AEC, its impact extended beyond design and modeling to broader digital technology integration in construction workflows. Elrefaey et al. (2022) provides valuable insights into how the COVID-19 pandemic accelerated the adoption of digital technologies in construction, specifically in the UAE. The authors highlight the significant role of technologies such as drones, RFID, and 3D laser scanning in improving data acquisition, project management, and communication during the pandemic. These tools helped mitigate social distancing challenges and improved productivity by reducing survey time and enhancing safety on construction sites. The paper also emphasizes the barriers to wider digital technology adoption in construction, including economic and technical constraints. It suggests that future efforts should focus on overcoming these challenges by increasing investments in digital tools and training, which could lead to greater industry resilience and sustainability.

Similarly, as digital technologies continue to drive efficiency in construction, the integration of advanced management systems with BIM plays a crucial role in optimizing energy performance. Kozlovska et al. (2023) examine the synergy between Building Energy Management Systems (BEMS) and BIM, emphasizing their combined potential to enhance energy efficiency and overall building performance. Through real-world case studies, their study demonstrates how this integration improves energy use within buildings while addressing key challenges such as data uncertainties and software interoperability. In addition to streamlining energy management, the authors highlight BIM's essential role in optimizing industrial buildings for sustainable operations. By bridging the gap between energy management and digital modeling, this research underscores the importance of BIM-BEMS integration in fostering energy-efficient practices and contributing to the broader goal of sustainable construction.

In addition to enhancing energy efficiency in building management, the integration of BIM with emerging digital technologies extends its impact to industrial infrastructure. Badenko et al. (2024) introduce principles for sustainably integrating BIM and DT technologies in industrial settings, focusing on minimizing environmental impact, optimizing resource efficiency, and ensuring long-term resilience. Their study presents a framework to achieve these goals through lifecycle management, data interoperability, and stakeholder collaboration, proposing key solutions for the challenges faced in "Factories of the Future." This work lays the groundwork for future research and real-world applications in sustainable industrial operations.

2.5. IoT and Smart Building Systems in Sustainable Design

Similarly, as BIM and DT technologies continue to transform industrial infrastructure, their integration with the IoT is increasingly shaping the future of smart building systems. The study by Tang et al. (2019) provides an in-depth review of the integration of BIM and IoT, focusing on their synergy to enhance building performance, optimize energy use, and improve occupant comfort. They discuss current technological challenges and benefits, with a particular emphasis on the role of IoT devices like sensors in providing real-time data. The paper highlights future trends towards seamless integration, focusing on data interoperability and real-time analytics, which will be essential for advancing smart building systems and contributing to smart city development.

Expanding on the challenges associated with smart city development, Wang et al. (2021) investigate the adoption challenges of IoT and AI technologies in smart cities, focusing on China. Their research identifies key obstacles such as technical complexity, data security, and the shortage of skilled professionals, and introduce a cause-and-effect model using the DEMATEL method to understand the interconnections between these

challenges. The study advocates for coordinated efforts by policymakers, industry leaders, and researchers to overcome these obstacles, particularly by strengthening infrastructure and human capital to enable successful smart city development.

Building on the role of IoT in enhancing urban resilience, Xie et al. (2022) examine smart building technologies aimed at addressing challenges introduced by the COVID-19 pandemic. Their study makes a particularly valuable contribution by exploring innovative ventilation systems and air-quality management solutions designed to mitigate virus transmission in indoor environments. Emphasizing the integration of IoT-enabled sensors and smart systems, the research highlights their effectiveness in monitoring and improving indoor environmental quality (IEQ). In addition, the authors propose strategies for embedding these technologies into future building designs, ensuring resilience and health-focused construction that can adapt to similar public health crises. In addition to improving indoor environmental quality, the integration of advanced technologies is also transforming energy management in buildings. Naeem et. al. (2024) highlights how Industry 4.0 technologies like AI and IoT can optimize renewable energy systems through enhanced performance and predictive maintenance. It suggests that deeper integration of these technologies into building systems could further boost energy efficiency and sustainability. Similarly, the study by Asif et al. (2024) highlights the role of digital technologies like BIM, IoT, and DTs in improving building performance and sustainability. It emphasizes challenges such as data privacy, integration difficulties, and high initial costs, while proposing the expansion of these technologies to reach net-zero energy goals through advanced analytics and automation.

2.6. Digital Twins: A Nexus of Virtual and Physical Systems

As digital technologies continue to drive innovation in building performance and sustainability, DTs are emerging as a transformative solution that bridges the gap between virtual modeling and real-world applications. Zhang et al. (2021) review the role of DTs in enhancing sustainability within positive energy districts. It highlights how DTs integrate with simulation tools to optimize building performance, manage energy efficiency, and enable sustainable urban development. The authors emphasize the potential of twins to accelerate the transition towards positive energy districts by offering real-time insights into energy usage patterns. They suggest that future work should explore twins' scalability and adaptability to varying urban contexts, contributing to smarter and more sustainable cities. Similarly, Zhang et al. (2024) extend this discussion by exploring how DT technologies can enhance sustainability in the construction industry through their integration with BIM, IoT, AI, and other advanced technologies. Their study underscores the importance of DTs in optimizing resource usage and minimizing environmental impacts throughout both construction and operation phases. However, realizing the full potential of twins requires overcoming challenges related to data integration and scalability. Addressing these limitations could pave the way for more effective and widespread adoption of DTs, reinforcing their role as a cornerstone of sustainable construction practices. In addition to their role in resource optimization, DTs are also transforming how buildings manage energy efficiency and occupant comfort. The research conducted by Arowoiya et al. (2024) explores the application of DT technology in improving thermal comfort and energy performance in buildings. It highlights the evolving role of DTs in optimizing building performance by providing real-time monitoring and predictive analytics, particularly in the context of energy use and indoor environmental quality. A unique contribution of this work lies in its thorough review of how DTs can be integrated with thermal comfort systems and energy management frameworks, enabling adaptive strategies for sustainability. The paper also discusses future directions, emphasizing the need for further research into dynamic, occupant-centric solutions that can adapt to changing building conditions and user preferences. Expanding on the potential of twins in sustainable construction, the study by Zahedi et al. (2024) examines how they contribute to optimizing building performance, improving energy efficiency, and enabling real-time monitoring of environmental conditions. Their research focuses on the integration of twins with other emerging technologies like AI and IoT to enhance energy efficiency and operational sustainability in buildings. Furthermore, the study identifies gaps in current research and calls for more attention to the development of scalable DT models that could provide more reliable predictive analytics for building lifecycle management. This work provides valuable insights into the future direction of DT in sustainable construction, especially regarding the need for continuous innovation and integration of smart technologies to meet sustainability goals.

Similarly, Yoon et al. (2024) explore how the integration of twin technology with BIM enhances building operations and maintenance. It highlights the potential of using real-time data for predictive analytics and seamless interactions between physical and digital assets, improving energy efficiency, sustainability, and operational performance. The paper suggests future directions that focus on enhancing real-time modeling capabilities and expanding the integration of these technologies for dynamic building management. Extending the application of DTs beyond individual buildings, García-Aranda et al. (2024) investigate their role in urban sustainability, using a university campus in Madrid as a case study. Their research demonstrates how twins can simulate and optimize urban planning strategies, focusing on energy management, waste reduction, and resource efficiency. The study uniquely emphasizes the role of DTs in enhancing decision-making

for sustainable urban development. Future research should integrate social and behavioral factors into DTs to promote more participatory and inclusive urban planning. In addition to their role in sustainable urban planning, DTs are also transforming smart city management through their integration with big data and real-time analytics. Lv et. al. (2022) explores the integration of DTs and BIM with big data to optimize smart city management, particularly during the COVID-19 pandemic. Its unique contribution lies in showing how these technologies can enhance urban management by enabling real-time data exchange and predictive analytics to increase the adaptability and resilience of infrastructure during crises. The authors highlight the importance of further integrating advanced data analytics with DT and BIM to improve the sustainability and efficiency of smart city systems in the future. Similarly, Yang et al. (2022) investigate the potential of twin technologies in enhancing energy efficiency and sustainability in green buildings. The study highlights how DTs can simulate and monitor building systems in real-time, enabling dynamic adjustments to optimize resource use and maintain occupant comfort. A unique contribution of this study is its emphasis on integrating AI and data analytics into DT frameworks to predict system behaviors and facilitate decision-making. The paper also underscores future directions, including the need for standardized frameworks and increased focus on cybersecurity to fully realize the potential of DTs in intelligent building management systems.

Building on the integration of digital technologies in the built environment, the study by Sepasgozar et al. (2023) explores the convergence of BIM and twin technologies, emphasizing their transformative impact on the construction industry. Their study discusses how these technologies can enhance automation, integration, and sustainability in construction processes. The authors also provide a roadmap for implementation, pointing to their significant role in shaping future digital construction practices.

Expanding on the role of DTs in optimizing built environments, Tahmasebinia et al. (2023) examine their integration in building energy management, emphasizing capabilities in real-time monitoring, energy consumption prediction, and overall efficiency enhancement. A key focus of their study is the combination of DT with machine learning techniques, which significantly improves predictive accuracy and optimizes building performance. Looking ahead, the authors suggest that further advancements in these integrations could drive even greater energy efficiency and support sustainable development goals, particularly in the context of intelligent energy management systems.

2.7. Emerging Technologies and Specialized Applications (e.g. AR/VR, Robotics, Blockchain, 3D Printing)

Emerging technologies in AEC are redefining sustainable construction by integrating innovative solutions into complex building systems. AR and VR facilitate enhanced visualization and real-time collaboration, improving design processes and project efficiency. Robotics and drones are transforming site management by increasing precision, safety, and speed in construction operations (Elrefaey et. al., 2022). Similarly, blockchain technology ensures security and transparency in managing construction supply chains, while addressing the digital vulnerabilities through advanced cybersecurity measures (Naeem et. al., 2024).

Zhou and Liu (2024) highlighted several research gaps regarding digital technologies and energy efficiency in buildings and smart cities from a sustainability perspective. These include a lack of comprehensive reviews on energy digitalization technologies for high-efficiency, low-carbon building energy systems and unclear roles of tools like IoT, blockchain, and DTs in integrated multi-energy systems. Additionally, distributed energy systems face unaddressed challenges in system configurations, multi-agent energy management, and energy flexibility for managing spatial and temporal mismatches in renewable resources. The resilience of energy systems to both frequent low-impact events (e.g., climate change) and rare high-impact events (e.g., extreme weather, regional conflicts) also requires further exploration with digital technologies.

Specialized applications, such as Generative Adversarial Networks (GANs), neural networks, and computer vision, are offering novel methods for analyzing architectural data, leading to refined modeling and simulation practices (Rampini and Cecconi, 2022). Additionally, 3D printing accelerates prototyping and facilitates on-demand construction, while RFID technology streamlines asset tracking and logistics (Elrefaey et. al., 2022). These tools not only optimize workflows but also reduce waste, contributing to sustainability goals.

Collectively, these cutting-edge innovations highlight the transformative potential of technology in achieving net-zero and sustainable construction objectives. However, they also underscore the importance of overcoming challenges such as system integration, cost barriers, and workforce development. As research continues to advance, multidisciplinary approaches will be key to unlocking the full potential of these emerging technologies in the built environment.

3. Materials and Methods

This study utilized a systematic literature analysis to investigate the role of digital technologies in advancing sustainable building design in the post-pandemic era. The literature review followed a structured selection process, beginning with an extensive database search that initially retrieved thousands of articles. To ensure relevance and quality, a rigorous screening process was applied based on predefined inclusion criteria, prioritizing peer-reviewed studies published between 2019 and 2024. After careful evaluation, 35 studies focusing on digital technologies and sustainability in the

AEC were selected, with particular emphasis on the impact of post-pandemic developments. A comprehensive literature search was conducted using Google Scholar, focusing on peer-reviewed publications from 2019 to 2024.

3.1. Literature Search and Selection Process

To ensure relevancy, specific keywords were used, including:

- "digital technologies in sustainable design",
- "post-COVID sustainability practices in AEC", and
- "impact of COVID-19 on AEC".

The search yielded a total of 35 peer-reviewed papers that were selected based on their contributions to the integration of advanced technologies such as AI, ML, BIM, and DTs in promoting sustainability in building design and construction. The inclusion criteria focused on peer-reviewed studies published between 2019 and 2024 that explored the role of digital technologies (AI, ML, BIM, IoT, and DTs) in advancing sustainability within the AEC industry. Non-peer-reviewed articles, studies unrelated to AEC, and those published before 2019 were excluded to maintain the relevance and rigor of the review.

The findings of this study provide valuable insights into how the COVID-19 pandemic accelerated digital transformation in the AEC industry and highlight the critical role of advanced technologies in achieving sustainability goals. By analyzing key applications, barriers, and future trends, this research contributes to the development of actionable strategies for integrating digital tools to address resource efficiency, energy optimization, and resilience in building systems.

3.2. Statistical Analysis

The selected papers were analyzed using a thematic analysis methodology involving a structured, qualitative approach to identify, analyze, and report patterns within the data. Initially, all selected literature underwent a thorough review to ensure familiarity with the content, followed by systematic coding to highlight significant concepts related to digital technologies, sustainability practices, challenges, and emerging trends within the AEC industry post-pandemic. Themes were iteratively developed through reviewing and grouping related codes, ensuring comprehensive coverage of critical topics.

The evaluation criteria employed for selecting the final 35 peer-reviewed articles included their explicit relevance to key digital technologies (AI, ML, BIM, IoT, DTs), their clear demonstration of implications for sustainable practices within building design and construction, peer-reviewed publication status, and publication timeframe between 2019 and 2024. Studies not meeting these predefined criteria were excluded to maintain methodological rigor and relevance.

The thematic analysis specifically focused on the following key aspects:

- Technological Advancements: Examination of digital tools such as AI, IoT, and DTs for optimizing energy efficiency, predictive maintenance, and real-time performance monitoring.
- Sustainability Applications: Identification of technologies that address resource efficiency, energy optimization, and lifecycle sustainability.
- Challenges and Barriers: Analysis of constraints such as interoperability issues, high implementation costs, and data privacy concerns that hinder broader adoption.
- Emerging Research Trends: Highlighting focus areas such as smart cities, renewable energy integration, and the use of advanced data analytics.

To summarize the findings, a table was compiled to organize the selected studies, their contributions, and relevant keywords. Additionally, a word cloud was generated to visualize the dominant themes and technologies identified during the analysis.

3.3. Visual Data Representation

To visualize the key trends identified from the literature analysis, Figures 2 through 5 illustrate the relationships between technological advancements and sustainability challenges, and practical applications in the AEC industry. This approach provided a clear overview of the emerging trends shaping sustainable building practices in a post-pandemic context.

4. Results

This section presents the results derived from the thematic analysis of the selected literature. The qualitative data collection and analysis methods utilized are detailed comprehensively in section 3. Materials and Methods. The subsequent sections specifically focus on interpreting and discussing the key research trends, technological advancements, sustainability applications, challenges, and barriers identified through this analysis, rather than revisiting methodological details.

The analysis highlighted key findings across several areas: technological advancements, sustainability applications, challenges and barriers, and emerging research directions. Technologies such as AI, IoT, and DTs were found to play crucial roles in optimizing energy efficiency, monitoring building performance in real-time, and enabling predictive maintenance. Challenges such as interoperability, high costs, and data privacy were also identified as significant barriers to the broader adoption of these technologies in the AEC. The research further revealed a shift in the industry towards a more data-driven approach to sustainability, with increasing emphasis on smart cities, renewable energy integration, and the use of data analytics for optimizing building performance. To summarize these findings, a Table 1 was compiled listing the 35 selected studies, their contributions, and associated keywords. Table 1 provides an organized overview of the technological trends and research themes emerging in sustainable building design post-COVID. The subsequent sections will explore these trends in more detail, shedding light on the key drivers shaping the future of sustainable building practices in the AEC industry.

Table 1. Overview of key technologies, applications, and future directions for sustainability in the AEC industry

Author(s) and Year	Technologies Utilized	Purpose and Objectives of Key Technologies	Applications for Sustainability	Challenges and Barriers	Research Keywords	Key Findings and Contributions	Future Research Directions
Tang et al. (2019)	BIM, IoT	To explore BIM and IoT integration for improving construction, operation, and facility management	Real-time monitoring, energy management, disaster response	Interoperability, lack of integration standards, sensor reliability	BIM, IoT, facility management, construction monitoring, sustainability	Identified integration methods for BIM and IoT and proposed applications in health and safety, resource monitoring	Research on service-oriented architecture (SOA) patterns, cloud computing, and interoperability for BIM-IoT systems
Darko et al. (2020)	AI (Genetic Algorithms, Neural Networks, ML)	To evaluate the role of AI in optimizing processes and decision-making in the AEC industry using scientometric analysis	Energy optimization, project management, lifecycle efficiency	Limited cross-discipline collaboration, data integration issues	AI, Genetic Algorithms, Neural Networks, Machine Learning, AEC	Highlights widespread use of Genetic Algorithms and Neural Networks for optimization and decision-making in AEC applications	Focus on integrating AI with robotics, life cycle assessment, thermal comfort, and energy efficiency in the AEC industry
De Las Heras et al. (2020)	ML	to enhance the efficiency of urban services, minimize environmental impacts, and foster sustainability in smart city operations.	optimizing energy use in buildings, improving air quality monitoring, and deploying intelligent transportation systems for sustainabilitv.	limited data availability, integrating diverse urban subsystems, and addressing ethical concerns related to privacy and data securitv.	ML, Smart Cities, Sustainability, Urban Monitoring, Energy Optimization, Air Quality Monitoring, Intelligent Transportation Svstems. Data Privacv	Demonstrates that machine learning provides adaptive and predictive tools, enabling smarter and more sustainable urban services and infrastructure.	Recommends refining ML algorithms for better energy optimization, scaling applications to mid-sized cities, and integrating blockchain with IoT for secure ecosystems.
Rathore et al. (2021)	AI, ML, Big Data, IoT, DTs	To systematically review the integration of AI-ML and Big Data with DTs to optimize industrial processes and enhance decision-making	Smart manufacturing, resource efficiency, predictive maintenance, fault detection	Interoperability, data privacy, lack of standards	DTs, AI, ML, Big Data, IoT, Industry 4.0	Proposed a big data-driven, AI-enriched reference architecture for creating DT-enabled systems; identified tools and frameworks for DT creation	Addressing data standardization challenges, developing multi-domain DT frameworks, and exploring advanced AI-ML algorithms for real-time optimization
Wang et al. (2021)	BIM	To explore the influence of the COVID-19 pandemic on BIM adoption intention using event system theory and innovation diffusion theory	Enhanced collaboration, emergency construction (e.g., hospitals), reduced rework, real-time monitoring	High complexity, interoperability issues, low adoption rates in developing countries	BIM, COVID-19, adoption intention, event criticality, innovation diffusion	Demonstrated that perceived event criticality and technical features (compatibility, relative advantage) indirectly influence BIM adoption intention	Promoting BIM adoption through government incentives, cross-cultural research, and stakeholder-specific adoption studies
Wang et al. (2021)	IoT, AI	To analyze and address challenges in adopting IoT and AI for sustainable smart cities in China	Smart transportation, energy distribution, waste management, public health optimization	Lack of infrastructure, insufficient funds, cybersecurity risks, lack of trust in AI and IoT, skilled professional shortages	IoT, AI, smart cities, sustainability, adoption challenges, DEMATEL	Established cause-effect relationships among ten identified adoption challenges; proposed strategies for overcoming barriers to enhance AI and IoT implementation in urban management	Addressing data security, enhancing trust in AI and IoT technologies, promoting scalable frameworks for smart city applications
Zhang et al. (2021)	DTs, IoT, AI, BIM	To review the role of DTs in Positive Energy Districts (PEDs), including simulation tools and applications	Energy optimization, circular economy, climate neutrality	Data analysis, semantic interoperability, business model challenges, data security and management	DTs, PEDs, energy optimization, AI	Identified digital twin tiers: (1) enhanced BIM, (2) semantic platforms, (3) AI-enabled agents; proposed integration of multi-tier tools for PED optimization	Focus on advanced AI/ML methods for predictive analytics and holistic sustainability strategies in PEDs
Rampini and Cecconi (2022)	AI, DTs GANs, ML, Neural Networks, Computer Vision	To analyze the current applications of AI in construction asset management, identify research gaps, and explore emerging trends for future developments	Energy management and optimization, condition assessment for predictive maintenance, risk management, lifecycle cost reduction	High implementation costs, limited interoperability, lack of structured datasets for AI training	Asset Management, AI, Neural Networks, Machine Learning, Computer Vision	dentified AI applications in energy, risk, and lifecycle management; highlighted trends like GANs for data augmentation, DTs for real-time monitoring, and bibliometric analysis of research gaps	Developing frameworks for data standardization and interoperability; exploring hybrid AI models for decision-making; integrating DTs with AI for lifecycle management
Strielkowski et al. (2022)	AI, IoT, Big Data, Blockchain	To assess how smart city technologies and governance principles contributed to sustainable urban management during and post-COVID-19	Urban resilience, energy management, intelligent transport systems	High costs, interoperability, need for data privacy	Smart cities, sustainability, urban mobility, AI, IoT, post-COVID-19	Highlighted integration of ICT and AI in smart city resilience strategies; proposed frameworks for pandemic-resilient urban planning and mobility	Emphasized importance of advancing privacy-preserving AI and expanding international collaboration for more robust, scalable smart city solutions
Elrefaey et al. (2022)	BIM, Drones, RFID, Laser Scanning, Cloud Computing	To evaluate the impact of COVID-19 on digital technology adoption in the UAE construction industry	Enhanced project success through data-driven decision-making and virtual collaboration	High initial costs, lack of training, data privacy concerns	BIM, Drones, RFID, Construction Productivity, COVID-19	Identified a significant increase in digital technology adoption during and after COVID-19, with smaller organizations accelerating investments	Broader adoption of data-driven virtual technologies, addressing training gaps, and improving interoperability
Megahed et al. (2022)	AI, BIM, IoT, DTs	To investigate the evolution of BIM into DTs for optimizing the AECO sector	Achieving Sustainable Development Goals (SDGs), enhancing cyber-physical integration	Technical, societal, and operational challenges	BIM, DTs, IoT, AI, sustainability, lifecycle optimization	Demonstrated the potential of DTs in planning, managing, predicting, and optimizing AECO projects to achieve SDGs	Proposes theoretical models to validate DTs frameworks and encourages future quantitative studies involving stakeholder perspectives
Xie et. al. (2022)	IoT, AI, automation technologies.	To enhance health, safety, and energy efficiency in buildings, with a specific focus on pandemic resilience through smart, adaptive systems.	Optimizing energy use, reducing operational costs, lowering carbon emissions, and improving indoor air quality through intelligent systems.	Cybersecurity risks, data privacy concerns, and high costs of deployment and maintenance.	Smart buildings, IoT, pandemic resilience, AI, energy optimization, adaptive technologies.	Demonstrates the pivotal role of smart systems (e.g., HVAC optimization, occupancy-focused controls) in pandemic preparedness and in ensuring sustainable building operations.	Enhancing system interoperability, advancing AI for predictive maintenance, and addressing ethical concerns related to data usage and privacy.
Lv et al. (2022)	DTs, BIM, Big Data, IoT, AI, Cloud Computing, ML, Bayesian Networks	To improve the management and construction of smart cities by integrating BIM and DTs with advanced data-processing technologies	Enhanced urban resource management, real-time monitoring for disaster response and public health, smart city infrastructure optimization	High complexity of big data integration, data uncertainty, lack of interoperability between systems	Smart cities, DTs, BIM, IoT, AI, Bayesian Networks, Big Data, urban management	Proposed a Bayesian Network Structural Learning (BNSL) algorithm for handling complex multi-dimensional urban data, integrated DTs and BIM for enhanced predictive analytics and management	Development of advanced algorithms for multi-source heterogeneous data fusion, application of semi-supervised and multimodal learning techniques for smart cities
Yang et. al. (2022)	DTs, data-driven simulation, monitoring	To enhance Intelligent Green Buildings (IGBs) by integrating DTs for real-time system management, efficiency, and optimization.	Resource optimization, energy savings, reduced environmental impact, and improved building system intelligence.	Limited integration frameworks for DTs, issues with data standardization, interoperability challenges, and high implementation costs.	DTs, Intelligent Green Buildings, sustainability, smart cities, predictive analytics.	DTs significantly enhance IGB functionality by bridging virtual and physical systems, providing insights for sustainable urban development.	Focus on integrating DTs with smart city technologies, advancing green design, and addressing socio-economic challenges.

Table 1. Overview of key technologies, applications, and future directions for sustainability in the AEC industry (continued)

Author(s) and Year	Technologies Utilized	Purpose and Objectives of Key Technologies	Applications for Sustainability	Challenges and Barriers	Research Keywords	Key Findings and Contributions	Future Research Directions
Kozlovska et al. (2023)	BEMS, BIM, DTs, IoT, AI, ML	To explore the synergy between BEMS and BIM for improving energy efficiency and overall building performance through integrated monitoring and control	Real-time energy usage monitoring, enhanced indoor environmental quality, lifecycle energy optimization	Lack of interoperability, limited data exchange standardization, high implementation costs	Building Energy Management Systems, BIM, Digital Twin, Energy Efficiency, Sustainability, Building Performance	Demonstrated BEMS-BIM integration reduces energy consumption and improves sustainability; highlighted Digital Twin applications in bridging physical-virtual system gaps	Standardized protocols for BEMS-BIM data exchange; expanded Digital Twin capabilities for predictive energy management; cost reduction strategies for system implementation
Sepasgozar et al. (2023)	BIM, DTs, IoT, AI, VR, AR, Cloud Computing, Industry 4.0	To identify and leverage disruptive and convergent technologies in construction	Circular economy principles for resource efficiency, energy optimization through digital workflows, remote operation and monitoring for construction	High implementation costs, resistance to change in construction, interoperability and standardization issues, data security and management challenges	BIM, DTs, IoT, VR, AR, sustainability, Industry 4.0, circular economy	Highlighted the importance of BIM and DT integration for lifecycle sustainability, proposed a framework for digital adoption aligned with Industry 4.0 principles, showcased immersive technologies for training and safety	Development of standards for integrating DTs with advanced manufacturing, exploration of AI-assisted immersive technologies, enhancing data interoperability and security across platforms
Tahmasebinia et al. (2023)	DTs, BIM, IoT, ML, Energy Simulation Tools	To explore the potential of DT technology in improving energy efficiency and achieving sustainability through real-time monitoring and optimization	Real-time energy monitoring, predictive maintenance, simulation of energy performance, carbon emissions reduction	High computational demands, interoperability issues, economic and policy-related barriers	Digital Twin, BIM, Machine Learning, Energy Efficiency, Carbon Emissions, Building Management Systems	Demonstrated how DTs improve operational efficiency and reduce carbon footprints, integrated real-time data from BIM and IoT systems, and optimized HVAC systems	Development of advanced ML algorithms for energy prediction, exploring policy frameworks, enhancing system interoperability
Adewale et al. (2024)	AI, ML, DTs, IoT	To optimize building performance and reduce environmental impacts through smart systems	Carbon footprint reduction, energy efficiency, waste minimization	High implementation costs, data security, skills gap	AI, ML, IoT, DTs, sustainability, building lifecycle	AI for predictive maintenance, IoT for system automation, DTs for real-time monitoring	Overcoming data privacy issues, improving scalability
Bibri et al. (2024)	AI, ML, DTs, IoT	Enhance sustainability in smart cities and buildings through data-driven technologies	Energy optimization, cost reduction, occupant comfort	Data security, standardization issues	AI, ML, IoT, smart cities, energy management	AI and IoT for dynamic management systems, DTs for building performance	Implementing advanced algorithms, standardized frameworks
Oulefki et al. (2024)	AI, DTs	Optimize building operations and enhance sustainability through AI-powered solutions	Predictive maintenance, renewable energy integration	Data privacy, standardization, scalability	AI, DTs, smart buildings, predictive maintenance	Use of AI for anomaly detection, generative AI for scenario modeling	Overcoming fault detection challenges, expanding AI integration
Ferdaus et al. (2024)	AI, ML, DTs, IoT, Robotics, Blockchain	Drive energy sector toward net-zero emissions through digital technologies	Optimization of energy systems, enhancing renewable adoption	Ethical issues, standardization gaps	AI, ML, IoT, blockchain, energy efficiency, sustainability	AI for energy optimization, DTs for real-time monitoring	Standardization, scalability, ethical considerations
Arsecularatne et al. (2024)	AI, ML, IoT, DTs, BIM, Industry 4.0	Improve energy efficiency, sustainability, and operational performance in buildings	Integration of renewable energy sources, resource efficiency	High costs of implementation	AI, IoT, BIM, energy efficiency, sustainability	Integration of DTs with BIM for optimized energy management	Addressing costs and scalability in smart building solutions
Renganayagalu et al. (2024)	AI, ML, IoT, DTs	Promote sustainability and optimize energy performance in buildings	Energy optimization, resource management	Data integration challenges	AI, ML, IoT, energy performance, building systems	Use of DTs for energy performance, AI for optimization	Research into generative AI and predictive analytics for building systems
Karatzas et al. (2024)	AI, ML, DTs	To propose a text analytic framework for exploring the integration of DTs and Machine Learning to optimize indoor environmental performance	Energy efficiency, occupant comfort, indoor air quality (IAQ)	Interoperability challenges, lack of autonomous optimization	DTs, AI, ML, indoor environment quality, energy efficiency, occupant comfort	Developed a clustering framework leveraging Digital Twin architecture and AI/ML for analyzing indoor environmental quality and energy efficiency	Expanding autonomous, real-time optimization for DTs and analyzing AI/ML applications in improving indoor air quality and occupant well-being
Villano et al. (2024)	ML, DL, ANNs, Decision Trees, SVM, Kriging, CNN, LSTM	To categorize and evaluate ML/DL techniques for predicting, optimizing, and managing building energy consumption	Energy design and retrofit optimization, renewable energy integration, fault detection, control of heating/cooling systems	High computational costs, need for large datasets, limited model interpretability	Machine Learning, Deep Learning, Artificial Neural Networks, Energy Efficiency, Fault Detection	Identified the most commonly used ML/DL models and their energy management applications; emphasized ANN advantages for predictive accuracy; discussed DL strengths for time-series data	Development of hybrid frameworks combining ML/DL for prediction and control; creation of large-scale datasets; exploration of explainable AI for model interpretability
Badenko et al. (2024)	BIM, DTs, Facility Management.	To develop a strategic framework for integrating BIM and DTs in industrial infrastructure to address sustainability challenges such as environmental impact reduction and resource optimization.	Lifecycle management, data interoperability, and greener industrial practices.	Limited stakeholder collaboration and the complexity of implementing digital workflows.	sustainable industry, building information modelling, Factory of the Future, industrial facilities, digital twin, facility management	Proposed principles for Factory of the Future models using BIM-DTs for enhanced operational sustainability.	Expanding DT applicability in industrial automation and refining multi-stakeholder frameworks
Naeem et al. (2024)	AI, IoT, Blockchain, DT, 3D Printing, Big Data Analytics, Robotics, Sensors, Cloud Computing, Cybersecurity	To explore the functions, applications, and challenges of Industry 4.0 digital technologies in renewable energy systems (RES).	Renewable energy optimization, energy production and consumption efficiency, predictive maintenance, cost-effectiveness, and resource management	High implementation costs, interoperability issues, cybersecurity risks, potential job displacement	AI, IoT, Blockchain, Industry 4.0, Renewable Energy, Digital Twin, Big Data, 3D Printing, Robotics, Cybersecurity	Highlighted the transformative role of Industry 4.0 technologies in enhancing efficiency, sustainability, and cost reduction in RES; practical examples include AI improving solar panel efficiency by 20% and reducing production costs by 50%.	Addressing interoperability challenges, cybersecurity frameworks, collaborative policies, and integrating advanced AI models for RES management

Table 1. Overview of key technologies, applications, and future directions for sustainability in the AEC industry (continued)

Author(s) and Year	Technologies Utilized	Purpose and Objectives of Key Technologies	Applications for Sustainability	Challenges and Barriers	Research Keywords	Key Findings and Contributions	Future Research Directions
Asif et al. (2024)	AI, BIM, IoT, DTs, Blockchain, Machine Learning, Smart Meters, Sensors, 3D Printing	To analyze the role of digitalization and 13 key digital technologies in enhancing building sustainability across the lifecycle.	Energy optimization, real-time monitoring, predictive maintenance, waste reduction, enhanced user comfort, carbon footprint reduction, renewable energy	High initial cost, lack of skilled workforce, privacy and security risks, low customer awareness, interoperability issues	AI, BIM, IoT, DTs, Sustainability, Energy Efficiency, Renewable Energy, Smart Meters, Climate Change	Demonstrated a 30–50% improvement in building energy intensity by 2040 through digital technologies; highlighted applications like sensors for real-time data, BIM for sustainability assessments.	Development of cost-effective digital solutions, enhanced cybersecurity measures, and increased workforce training; exploration of integrated applications across building lifecycle stages
Zhang et al. (2024)	DTs, IoT, Data Fusion Techniques, AI.	To establish a conceptual framework for the implementation of DTs in reducing carbon emissions throughout the lifecycle of buildings.	Emission monitoring, optimization of construction processes, and real-time analytics for carbon reduction strategies.	Deployment costs, lack of interoperability standards, and limited stakeholder awareness.	DTs, sustainability, construction industry	Proposed proof-of-concept examples demonstrating DT's potential for transforming traditional construction practices into sustainable workflows.	Research into cost-effective implementations and enhancing AI-driven DT applications for resource efficiency
Arowoiya et al. (2024)	DT, AI, IoT, Sensors, ML (YOLOv4, ANN), BIM	To optimize thermal comfort, enhance energy efficiency, and enable predictive maintenance in buildings through advanced DT frameworks	Real-time monitoring of energy consumption and thermal comfort, prediction and optimization of energy usage, human-centric solutions for occupant well-being	Limited adoption of advanced sensors, lack of focus on subjective occupant perception, need for improved international collaboration	DT, IoT, thermal comfort, energy consumption, AI, ML, occupant well-being	Emphasized the role of DT in integrating occupant-centric data for improved energy optimization, highlighted algorithms like YOLOv4 and ANN for thermal comfort predictions and energy management	Investigate XR for real-time human-environment interactions, develop advanced sensor systems for enhanced environmental data, expand international collaboration
Zahedi et al. (2024)	BIM, DTs, Smart Systems.	To provide a scientometric review of Digital Twin applications in the construction industry, focusing on sustainability goals such as emission reductions.	Smart construction, energy optimization, lifecycle analytics, and carbon footprint reduction.	Data integration complexity and underdeveloped frameworks for smart system adoption.	BIM, construction, critical review, Digital Twin, scientometric analysis, sustainability	Identified major DT contributions to emissions reduction and net-zero targets, highlighting gaps in lifecycle stages (e.g., renovation, demolition).	Development of more robust lifecycle analysis tools and conceptual frameworks to bridge design and operational gaps
Yoon et al. (2024)	BIM, DTs, VIM (Virtual In-situ Modeling)	To enhance building operations and maintenance (O&M) by integrating BIM and DTs through Virtual In-situ	Real-time monitoring, fault detection, and lifecycle management of building systems	Interoperability challenges, reliance on sensor accuracy, need for automated processes	BIM, DTs, VIM, O&M, sustainability, lifecycle optimization	Introduced VIM as a bridge between BIM and DTs for advanced O&M, achieving high accuracy in fault detection and diagnosis	Development of autonomous VIM processes, integration of human behaviors into virtual models, and metadata schema standardization
García-Aranda et al. (2024)	GIS, DTs, IoT	To develop a Digital Twin for a university campus to support urban sustainability and decision-making	Air quality monitoring, solar energy optimization, mobility improvement, resource management	Interoperability issues, accessibility constraints, scalability of data integration	DTs, GIS, urban sustainability, smart campuses	Demonstrated a pilot Digital Twin incorporating GIS data for energy management, mobility analysis, and accessibility evaluation	Further integration of IoT and real-time data for advanced urban sustainability applications
Zhou and Liu (2024)	AI, IoT, DTs, Blockchain	To systematically review the role of digital technologies in energy efficiency and energy integration in smart cities	Climate change adaptation, energy flexibility, energy resilience, renewable energy integration	Interoperability issues, data privacy concerns, high computational demands	AI, IoT, DTs, energy flexibility, resilience, renewable energy	Demonstrated the role of DTs and multi-agent systems in distributed energy management and energy efficiency	Proposed integrating digital technologies for advanced multi-agent energy management and resilience in extreme events
Kazeem (2023)	AI, ML, IoT, BIM, DTs	Enhance energy efficiency, resource management, and lifecycle performance	Renewable energy integration, decarbonization strategies	Interoperability, data integration	AI, IoT, ML, DTs, energy modeling, carbon reduction	DTs for energy system coordination, AI for system optimization	Addressing data security and enhancing interoperability

The word cloud in Figure 1 derived from the research keywords underscores the central role of AI, IoT, and DTs, which are frequently highlighted for their transformative impact on sustainable building design and construction. ML is also a prominent theme, emphasizing its relevance in predictive analytics and optimization. Key concepts such as sustainability, energy efficiency, and energy performance are critical in driving the conversation around environmentally conscious practices. BIM and smart cities reflect the integration of advanced technologies for urban and building management. Emerging topics like blockchain, renewable energy, and smart buildings point to the expanding scope of innovations shaping the future of sustainable architecture.

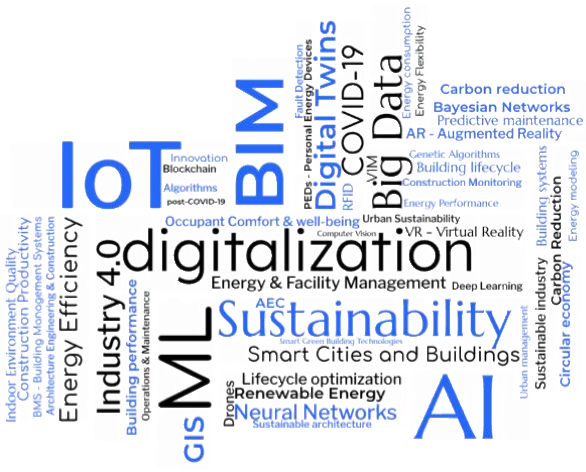


Figure 1. Key technologies and concepts in sustainable building design and the AEC industry (Source: created using Wordclouds.com).

To visualize the trends identified from the literature analysis, the following Figures 2 through 5 present a summary of the key technologies, challenges, and sustainability applications that are shaping the future of the AEC industry in a post-COVID world (Figures 2-5).

4.1. Key Technologies Driving Sustainability

The analysis of the "Technologies Utilized" in sustainable building design post-COVID, as shown in Figure 2, highlights the widespread adoption of key technologies. AI and DTs stand out as the most frequently mentioned in recent research. AI, appearing in 17.28% of studies, and DTs, cited in 16.67%, are pivotal in optimizing building performance, enabling real-time monitoring, predictive maintenance, and resource management. These technologies are especially valuable in post-pandemic building practices, where health, safety, and operational efficiency are of paramount concern. AI, combined with DTs, facilitates the continuous evaluation of building systems and allows for dynamic adjustments that improve energy efficiency and reduce carbon footprints (Gorina et. al.,2024; Yang et. al., 2022). IoT (14.20%) and ML (13.58%) are also critical players in advancing sustainability respectively. These technologies enhance the operational efficiency of buildings by collecting and analyzing real-time data from connected systems, which can optimize energy consumption, automate system adjustments, and reduce waste. The pandemic highlighted the necessity for smarter buildings that can respond to changing environmental and occupancy conditions. The growing use of IoT and ML aligns with this need, supporting not only energy efficiency but also the improvement of building resilience to future disruptions (Gorina et. al.,2024; Martínez-Cuevas et. al., 2024 ; Tokazhanov et. al., 2020; Jogunola et. al., 2022).

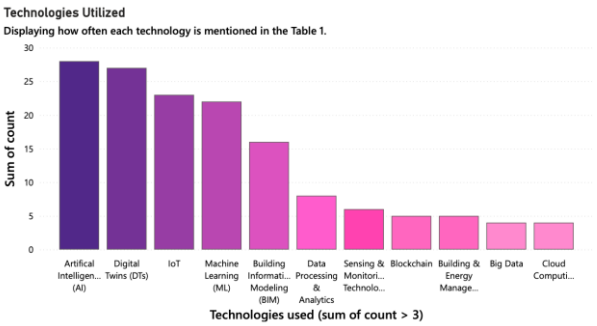


Figure 2. Overview of technologies for sustainability in the AEC industry (Source: Data compiled from Table 1, created using Microsoft Power BI).

Although BIM continues to play a fundamental role in the AEC industry, its prominence has slightly decreased compared to emerging technologies like AI and DTs. BIM, cited in 9.88% of studies, remains integral for coordinating design and construction processes. However, its role has expanded with the integration of more advanced technologies like AI and IoT, which enable the optimization of building performance during operation, making BIM increasingly part of a larger digital ecosystem (Coraglia et. al., 2024). Technologies such as Data Processing & Analytics, Sensing & Monitoring Technologies, and Blockchain have emerged as essential tools for enhancing the sustainability of building systems. These technologies support the efficient use of resources and provide valuable insights into operational performance. Blockchain, for example, is being leveraged to secure transactions and data in smart building systems, ensuring integrity in an increasingly digitalized environment (Tokazhanov et. al., 2020; Yang et. al., 2022). Additionally, more specialized tools like 3D Printing, Cybersecurity, and Geospatial Technologies offer unique solutions to specific challenges. The overall emphasis remains on core technologies like AI and DTs, while innovative tools continue to shape the evolving landscape of sustainable building practices.

4.2. Challenges and Barriers

Despite the promising potential of these technologies, several barriers to their widespread adoption persist. Figure 3 reveals that Interoperability (19.75%) remains the most significant challenge, followed by a variety of other challenges (Others, 16.05%). The integration of diverse systems and technologies, such as IoT devices and DTs, requires compatibility between different platforms, which is often hindered by a lack of universal standards and frameworks (Tokazhanov et. al., 2020). This challenge has become more evident in the post-pandemic context, where buildings need to operate as interconnected ecosystems, managing everything from energy use to occupant health. The inability of various systems to communicate effectively can delay or prevent the realization of full operational efficiency and sustainability goals.

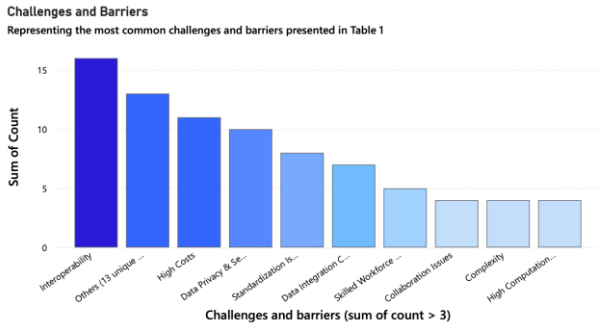


Figure 3. Overview of challenges, and barriers for sustainability in the AEC industry (Source: Data compiled from Table 1, created using Microsoft Power BI).

Another key barrier is the high costs associated with implementing digital technologies (13.58%). These costs, which include purchasing new systems, upgrading infrastructure, and training personnel, can be prohibitive for some organizations. Along with high costs, data privacy and security concerns (12.35%) have also become more pronounced, especially with the increased collection and sharing of sensitive information through IoT sensors and connected building systems. Ensuring the protection of occupant data has become a top priority as more personal information is captured by digital systems. Standardization Issues (9.88%) and Data Integration Challenges (8.64%) highlight the

complexities of aligning different systems and managing data effectively. The shortage of skilled workforce (6.17%) and High Computational Demands, Complexity, and Collaboration Issues (4.94%), each reflecting obstacles in the implementation of advanced technologies. Managing and analyzing vast amounts of data generated by IoT systems and DTs requires a high level of expertise. Additionally, the computational power needed for real-time analytics and simulation can strain existing infrastructure, requiring significant investment in both hardware and skilled personnel.

4.3. Focus Areas for Sustainability

The post-pandemic era has intensified the focus on energy optimization and efficiency (26.32%), with real-time monitoring and data analytics (17.54%) at the forefront of this movement (Figure 4). These technologies are crucial for creating buildings that can dynamically adjust to changing conditions, improving both operational efficiency and sustainability. The integration of renewable energy systems (14.04%) is also a significant trend, driven by the growing need to reduce carbon emissions and minimize dependency on non-renewable resources. This shift is particularly relevant in the context of the COVID-19 pandemic, as many organizations seek ways to reduce their environmental impact while also lowering operational costs (Gorina et. al.,2024; Martínez-Cuevas et. al., 2024; Tokazhanov et. al., 2020). Resource efficiency and management (12.28%) and predictive maintenance and lifecycle management (12.28%) have also gained traction as key applications for sustainability. These practices are focused on optimizing resources and extend the lifespan of building systems. Technologies like DTs, AI, and BIM are vital for these applications, as they allow for the proactive management of building systems, reducing waste and improving overall sustainability (Yang et. al., 2022). In addition, smart cities and infrastructure (8.77%) and occupant comfort and well-being (7.02%) have become central to the research agenda. The pandemic highlighted the importance of creating environments that support the health and well-being of occupants, emphasizing the need for buildings that not only function efficiently but also promote occupant safety and comfort. Finally, Smart Construction & Manufacturing (7.02%) and Circular Economy & Sustainability Principles (5.26%) point to forward-thinking approaches in sustainable building practices.

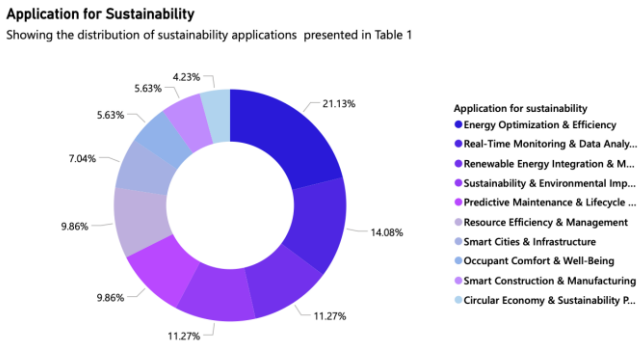


Figure 4. Overview of applications for sustainability in the AEC industry (Source: Data compiled from Table 1, created using Microsoft Power BI).

4.4. Research Trends and Keywords

Research Keywords like AI, IoT, DTs, and ML dominate the research landscape, reflecting the growing importance of these technologies in driving sustainable building practices (Figure 5). Sustainability, energy efficiency, and smart cities are also prominent, highlighting the ongoing shift toward creating more sustainable, resource-efficient urban environments. The continued emphasis on these technologies suggests a future where buildings will increasingly rely on interconnected systems to optimize performance, enhance occupant health, and minimize environmental impact (Gorina et. al.,2024; Martínez-Cuevas et. al., 2024 ; Tokazhanov et. al., 2020; Jogunola et. al., 2022). Future research directions are likely to focus on overcoming the current challenges, particularly interoperability, data privacy, and cost concerns, while expanding the capabilities of existing technologies. As the AEC industry embraces Industry 4.0 and neural networks, the sophistication of building systems will continue to increase, paving the way for more efficient, adaptive, and resilient buildings in the post-pandemic world.

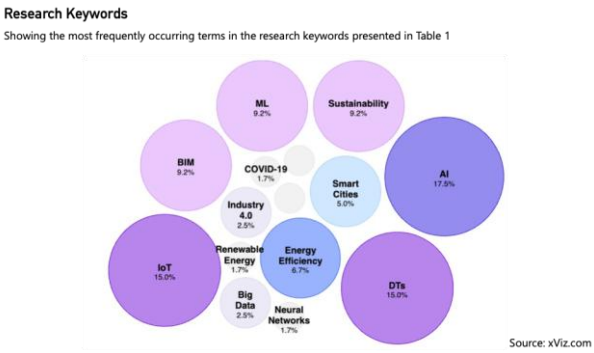


Figure 5. Overview of the most frequent keywords pattern for sustainability in the AEC industry (Source: Data compiled from Table 1, created using Microsoft Power BI and xViz.com).

4.5. Cause and Effect Relationship

There is a clear cause-and-effect relationship between the adoption of digital technologies and the pursuit of sustainability in building design. The growing reliance on

AI, IoT, and DTs is directly linked to the need for more efficient, adaptable, and sustainable building systems. However, the realization of these benefits is contingent upon overcoming the barriers of interoperability, cost, and data privacy. Addressing these challenges will be crucial for enabling the widespread adoption of these technologies, ultimately driving the creation of sustainable, resilient, and health-conscious built environments. In conclusion, the research trends reveal a future where digital technologies will play an integral role in achieving sustainability goals within the AEC industry. While there are challenges to overcome, the promise of energy-efficient, smart, and adaptive buildings continues to drive innovation in building design and operation.

5. Discussion

The future of sustainable building design in the AEC industry will be largely shaped by the ongoing advancement of digital technologies. Emerging innovations such as AI, ML, BIM, DTs, and IoT are becoming increasingly central to sustainability efforts. These tools are driving energy optimization, improving predictive maintenance, enhancing resource management, and enabling real-time monitoring, which collectively increase the resilience and efficiency of buildings. The findings of this study highlight that these technologies offer solutions to global challenges such as climate change, resource scarcity, and the need for post-pandemic recovery strategies (Coraglia, et. al., 2024; Han et. al., 2022; Gorina et. al., 2024).

An important insight from this research is that integrating these technologies also fosters principles of the circular economy, emphasizing waste reduction, material reuse, and lifecycle efficiency. For instance, DTs allow for advanced simulations to optimize energy use, while AI and ML enable data-driven decision-making for minimizing resource consumption. The study by Royan (2021) similarly highlights the increasing use of digital tools such as embodied carbon tracking, life cycle analysis (LCA), IoT, VR, drones, robotics, and 3D printing, emphasizing their role in reducing carbon emissions, enabling hybrid working patterns, and enhancing overall construction efficiency and safety. The future will likely see an increased emphasis on technologies such as 3D printing, robotics, and advanced construction techniques, which will contribute to cost-effective and environmentally sustainable solutions (Strielkowski et. al., 2022).

Royan (2021) further emphasizes the strategic importance of customer-driven sustainability initiatives. Providing stakeholders with real-time visualization of sustainability metrics and implementing sustainability ratings similar to energy efficiency labels can effectively drive behavioral change and informed decision-making towards sustainable building practices. Additionally, robotics and 3D printing technologies present significant socio-economic benefits by enhancing safety, reducing carbon-intensive material use, and addressing labor shortages, thus contributing effectively to long-term industry sustainability.

However, significant barriers remain, including interoperability issues, high implementation costs, and data privacy concerns. Both this study and Royan (2021) underscore the importance of addressing these challenges through supportive policies, institutional frameworks, and collaborative strategies. Governments, industry stakeholders, and researchers must work together to:

- Develop standardized frameworks for data integration and system interoperability,
- Promote regulations for green building certifications and energy-efficient technologies, and
- Invest in capacity-building programs to train a skilled workforce.

In summary, the integration of digital tools with sustainability goals represents a transformative shift for the AEC industry. These advancements will enable buildings to become not only resource-efficient and adaptive but also resilient to global disruptions such as pandemics and climate change. The findings of this study reinforce that the future of sustainable building design depends on both technological innovation and strategic implementation frameworks.

6. Conclusion

The study of sustainable building design and construction in the post-pandemic era reveals the profound impact of digital technologies on the AEC industry. In particular, the integration of technologies such as AI, ML, BIM, DTs, and IoT has reshaped the landscape of sustainable practices by enabling:

- Significant advancements in energy efficiency, predictive maintenance, and lifecycle optimization,
- Improved resource management, reducing material waste and environmental impacts, and
- Enhanced adaptability to emerging global challenges.

This study highlights that the post-COVID shift toward resilience and sustainability accelerated the adoption of digital tools. For instance, BIM has facilitated smarter workflows and integrated design processes, while IoT and DTs have enabled real-time monitoring and scenario simulations to optimize building performance. Royan (2021) similarly emphasizes that digital tools, such as embodied carbon tracking, LCA, robotics, and 3D printing, significantly enhance environmental sustainability, workforce efficiency, and safety, aligning closely with industry priorities. These technologies collectively support data-driven decision-making, improving building efficiency across its lifecycle. Royan (2021) further highlights customer-driven initiatives, including real-time visualization of sustainability metrics and sustainability ratings, as critical to driving informed decisions and promoting behavioral changes toward sustainable building practices.

Nevertheless, challenges persist, including

interoperability issues, data privacy concerns, and a shortage of skilled professionals. Addressing these barriers is essential for ensuring the widespread adoption of these technologies. Future studies should focus on overcoming these challenges while exploring the following directions:

- Advancing AI and ML applications to improve predictive modeling and dynamic energy management,
- Developing smart city frameworks that integrate renewable energy systems and connected infrastructures,
- Promoting circular economy principles by leveraging 3D printing and robotics for resource-efficient construction, and
- Exploring interdisciplinary approaches to enhance system interoperability, cybersecurity, and scalability.

In summary, this research underscores that the future of sustainable building design relies on continued technological innovation and strategic adoption of digital tools. By aligning emerging technologies with sustainability imperatives, the AEC industry can build adaptive, energy-efficient, and health-conscious environments capable of addressing climate change, resource scarcity, and future global crises. The successful integration of AI, IoT, and other cutting-edge technologies will drive transformative changes, ensuring a resilient and sustainable built environment in an evolving world.

Author Contributions

The percentages of the author' contributions are presented below. The author reviewed and approved the final version of the manuscript.

	A.S.S.
C	100
D	100
S	100
DCP	100
DAI	100
L	100
W	100
CR	100
SR	100
PM	100
FA	100

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The author declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans.

References

Adewale BA, Ene VO, Ogunbayo BF, Aigbavboa CO. 2024. A systematic review of the applications of AI in a sustainable building's lifecycle. Buildings, 14(7): 2137. https://doi.org/10.3390/buildings14072137.

Alizadehsalehi S, Hadavi A, Huang JC. 2020. From BIM to extended reality in AEC industry. Autom. Constr., 116: 103254. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103254.

Amoatey P, Omidvarborna H, Baawain M, Al-Mamun A. 2020. Impact of building ventilation systems and habitual indoor incense burning on SARS-CoV-2 virus transmissions in Middle Eastern countries. Sci. Total Environ., 733: 139356. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139356.

Aniekan Akpan Umoh CN, Nwasike OAT, Adekoya O O, Gidiagba JO. 2024. A review of smart green building technologies: Investigating the integration and impact of AI and IoT in sustainable building designs. Comput. Sci. IT Res. J., 5(1): 141–165. https://doi.org/10.51594/csitrj.v5i1.715.

Arowoiya VA, Moehler RC, Fang Y. 2024. Digital twin technology for thermal comfort and energy efficiency in buildings: A state-of-the-art and future directions. Energy Built Environ., 5(5): 641–656. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.05.004.

Arsecularatne B, Rodrigo N, Chang R. 2024. Digital twins for reducing energy consumption in buildings: A review. Sustainability, 16(21): 9275. https://doi.org/10.3390/su16219275.

Asif M, Naeem G, Khalid M. 2024. Digitalization for sustainable buildings: Technologies, applications, potential, and challenges. J. Clean. Prod., in press.

Badenko V, Bolshakov N, Celani A, Puglisi V. 2024. Principles for sustainable integration of BIM and digital twin technologies in industrial infrastructure. Sustainability, 16(22): 9885. https://doi.org/10.3390/su16229885.

Banai R. 2020. Pandemic and the planning of resilient cities and regions. Cities, 106: 102929. https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102929.

Bibri SE, Huang J, Jagatheesaperumal SK, Krogstie J. 2024. The synergistic interplay of artificial intelligence and digital twin in environmentally planning sustainable smart cities: A comprehensive systematic review. Environ. Sci. Ecotechnol., 20: 100433. https://doi.org/10.1016/j.ese.2024.100433.

Chen X, Chang-Richards AY, Ling FYY, Yiu TW, Pelosi A, Yang N. 2024. Digital technology-enabled AEC project management: Practical use cases, deployment patterns and emerging trends. Eng Constr Archit Manag, online publication. https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2023-0962.

Cheshmehzangi A. 2021. Revisiting the built environment: 10 potential development changes and paradigm shifts due to COVID-19. J Urban Manag, 10: 166–175. https://doi.org/10.1016/j.jum.2021.01.002.

Coraglia UM, Simeone D, Bragadin MA. 2024. Research perspectives on buildings' sustainability after COVID-19: Literature review and analysis of changes. Buildings, 14(2): 482. https://doi.org/10.3390/buildings14020482.

Darko A, Chan APC, Adabre MA, Edwards DJ, Hosseini MR, Ameyaw EE. 2020. Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities. Autom Constr, 112: 103081.

https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103081.

De Las Heras et al. 2020. Machine learning technologies for sustainability in smart cities in the post-COVID era. Sustainability, 12(22): 9320. https://doi.org/10.3390/su12229320.

Elavarasan R, Pugazhendhi R. 2020. Restructured society and environment: A review on potential technological strategies to control the COVID-19 pandemic. Sci. Total Environ., 725: 138858. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138858.

Elrefaey O, Ahmed S, Ahmad I, El-Sayegh S. 2022. Impacts of COVID-19 on the use of digital technology in construction projects in the UAE. Buildings, 12(4): 489. https://doi.org/10.3390/buildings12040489.

Ferdaus MM, Dam T, Anavatti S, Das S. 2024. Digital technologies for a net-zero energy future: A comprehensive review. Renew Sustain Energy Rev, 202: 114681. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114681.

Gorina L, Korneeva E, Kovaleva O, Strielkowski W. 2024. Energy-saving technologies and energy efficiency in the post-COVID era. Sustain Dev, 32(5): 5294–5310. https://doi.org/10.1002/sd.2978.

Gurram MK, Wang MX, Wang YC, Pang J. 2022. Impact of urbanization and environmental factors on spatial distribution of COVID-19 cases during the early phase of epidemic in Singapore. Sci Rep, 12: 9758. https://doi.org/10.1038/s41598-022-12941-8.

Han P, Wang L, Song Y, Zheng X. 2022. Designing for the post-pandemic era: Trends, focuses, and strategies learned from architectural competitions based on a text analysis. Front Public Health, 10: 1084562. https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1084562.

Inusah Y, Kazaz A, Ulubeyli S. 2025. Barriers to e-tendering implementation in the construction industry: A comprehensive review and analysis of a decade and beyond. Sustainability, 17(5): 2052. https://doi.org/10.3390/su17052052.

Jogunola O, Morley C, Akpan IJ, Tsado Y, Adebisi B, Yao L. 2022. Energy consumption in commercial buildings in a post-COVID-19 world. IEEE Eng Manag Rev, 50(1): 54–64. https://doi.org/10.1109/EMR.2022.3146591.

Karatzas S, Papageorgiou G, Lazari V, Bersimis S, Fousteris A, Economou P, Chassiakos A. 2024. A text analytic framework for gaining insights on the integration of digital twins and machine learning for optimizing indoor building environmental performance. Dev Built Environ, 18: 100386. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100386.

Kazeem KO, Olawumi TO, Osunsanmi T. 2023. Roles of artificial intelligence and machine learning in enhancing construction processes and sustainable communities. Buildings, 13(8): 2061. https://doi.org/10.3390/buildings13082061.

Kozlovska M, Petkanic S, Vranay F, Vranay D. 2023. Enhancing energy efficiency and building performance through BEMS-BIM integration. Energies, 16(17): 6327. https://doi.org/10.3390/en16176327.

Lv Z, Chen D, Lv H. 2022. Smart city construction and management by digital twins and BIM big data in COVID-19 scenario. ACM Trans Internet Technol, 18(2s). https://doi.org/10.1145/3529395.

Martínez-Cuevas C, Torres S, Pedrote Sanz M. 2024.. A digital twin of a university campus from an urban sustainability approach: Case study in Madrid (Spain). Urban Sci, 8(4): 167. https://doi.org/10.3390/urbansci8040167.

Megahed NA, Ghoneim EM. 2020. Antivirus-built environment: Lessons learned from COVID-19 pandemic. Sustain Cities Soc, 61: 102350. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102350.

Megahed NA, Ghoneim EM. 2021. Indoor air quality: Rethinking rules of building design strategies in post-pandemic architecture. Environ Res, 193: 110471. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110471.

Megahed NA, Hassan AM. Evolution of BIM to DTs: A paradigm shift for the post-pandemic AECO industry. Urban Sci 6(4): 67. https://doi.org/10.3390/urbansci6040067.

Microsoft Corporation, Microsoft Power BI [Computer software]. Microsoft. https://powerbi.microsoft.com.

Morawska L, Tang J, Bahnfleth W, Bluyssen P, Boerstra A, Buonanno G, et al. How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? Environ Int 142: 105832. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105832.

Mouratidis K, Yiannakou A. COVID-19 and urban planning: Built environment, health, and wellbeing in Greek cities before and during the pandemic. Cities 121: 103491. https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103491.

Naeem G, Asif M, Khalid M. Industry 4.0 digital technologies for the advancement of renewable energy: Functions, applications, potential and challenges. Energy Convers Manag X 24: 100779. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100779.

Nakicenovic N, Messner D, Zimm C, Clarke G, Rockström J, Aguiar AP, Boza-Kiss B, Campagnolo L, Chabay I, Collste D, et al. The digital revolution and sustainable development: Opportunities and challenges. World in 2050 Initiative, Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria, pp:25.

Oguntona OA, Akinradewo OI. Hindrances to the utilisation of the metaverse for net-zero buildings in South Africa. Infrastructures 10(2): 46. https://doi.org/10.3390/infrastructures10020046.

Oulefki A, Kheddar H, Amira A, Kurugollu F, Himeur Y. Innovative AI strategies for enhancing smart building operations through digital twins: A survey. SSRN. https://doi.org/10.2139/ssrn.5015571.

Pamidimukkala A, Kermanshachi S, Adepu N. Identifying critical factors that affected construction project performance during COVID-19. Int J Build Pathol Adapt, https://doi.org/10.1108/IJBPA-09-2024-0187.

Parracho DFR, Nour El-Din M, Esmaeili I, Freitas SS, Rodrigues L, Poças Martins J, Corvacho H, Delgado JMPQ, Guimarães AS. Modular construction in the digital age: A systematic review on smart and sustainable innovations. Buildings 15(5): 765. https://doi.org/10.3390/buildings15050765.

Pham VB, Wong P, Abbasnejad B. A systematic review of criteria influencing the integration of BIM and immersive technology in building projects. ITcon 30: 243–297. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2025.011.

Rampini L, Cecconi FR. Artificial intelligence in construction asset management: A review of present status, challenges and future opportunities. ITcon 27: 884–913. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.043.

Rathore MM, Shah SA, Shukla D, Bentafat E, Bakiras S. The role of AI, machine learning, and big data in digital twinning: A systematic literature review, challenges, and opportunities. IEEE Access 9: 32030–32052. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060863.

Renganayagalu SK, Bodal T, Bryntesen TR, Kvalvik P. Optimising energy performance of buildings through digital twins and machine learning: Lessons learnt and future directions. Proc 2024 4th Int Conf Appl Artif Intell (ICAPAI): 1–6. https://doi.org/10.1109/ICAPAI61893.2024.10541224.

Royan F. Digital sustainability: The path to net zero for design & manufacturing and architecture, engineering, & construction (AEC) industries. Analysis of the market in UK & Ireland,

Nordics and Benelux. Frost & Sullivan, London ,UK, pp:125.

Selcuk E. Impact of the COVID-19 pandemic on construction project performance: Challenges and strategic responses. J Asian Archit Build Eng. https://doi.org/10.1080/13467581.2025.2457385.

Sepasgozar SME, Khan AA, Smith K, Romero JG, Shen X, Shirowzhan S, Li H, Tahmasebinia F. BIM and digital twin for developing convergence technologies as future of digital construction. Buildings 13(2): 441. https://doi.org/10.3390/buildings13020441.

Shakil MH, Munim ZH, Tasnia M, Sarowar S. COVID-19 and the environment: A critical review and research agenda. Sci Total Environ 141022. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141022.

Strielkowski W, Zenchenko S, Tarasova A, Radyukova Y. Management of smart and sustainable cities in the post-COVID-19 era: Lessons and implications. Sustainability 14(12): 7267. https://doi.org/10.3390/su14127267.

Tahmasebinia F, Lin L, Wu S, Kang Y, Sepasgozar S. Exploring the benefits and limitations of digital twin technology in building energy. Appl Sci 13(15): 8814. https://doi.org/10.3390/app13158814.

Tang S, Shelden DR, Eastman CM, Pishdad-Bozorgi P, Gao X. A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends. Autom Constr 101: 127–139. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020.

Tokazhanov G, Tleuken A, Guney M, Turkyilmaz A, Karaca F. How is COVID-19 experience transforming sustainability requirements of residential buildings? A review. Sustainability 12(20): 8732. https://doi.org/10.3390/su12208732.

Villano F, Mauro GM, Pedace A. A review on machine/deep learning techniques applied to building energy simulation, optimization and management. Thermo 4(1): 100–139. https://doi.org/10.3390/thermo4010008.

Wang Q, Li S, Jiang F. Uncovering the impact of the COVID-19 pandemic on energy consumption: New insight from difference between pandemic-free scenario and actual electricity consumption in China. J Clea Prod 313: 127897. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127897.

Wang W, Gao S, Mi L, Xing J, Shang K, Qiao Y, Xu N. Exploring the adoption of BIM amidst the COVID-19 crisis in China. Build Res Inf 49(8): 930–947. https://doi.org/10.1080/09613218.2021.1921565.

Xie X, Ramakrishna S, Manganelli M. Smart building technologies in response to COVID-19. Energies 15(15): 5488. https://doi.org/10.3390/en15155488.

Yang B, Lv Z, Wang F. Digital twins for intelligent green buildings. Buildings 12(6): 856. https://doi.org/10.3390/buildings12060856.

Yap JBH, Chow IN, Shavarebi K. Criticality of construction industry problems in developing countries: Analyzing Malaysian projects. J Manag Eng 35(5): 04019020. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000709.

Yoon S, Lee J, Li J, Wang P. Virtual in-situ modeling between digital twin and BIM for advanced building operations and maintenance. Autom Constr 168: 105823. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105823..

Zahedi F, Alavi H, Majrouhi Sardroud J, Dang H. Digital twins in the sustainable construction industry. Buildings 14: Article 11. https://doi.org/10.3390/buildings14113613

Zhang X, Shen J, Saini PK, Lovati M, Han M, Huang P, Huang Z. Digital twin for accelerating sustainability in positive energy district: A review of simulation tools and applications. Front Sustain Cities 3: 35. https://doi.org/10.3389/frsc.2021.663269.

Zhang Z, Wei Z, Court S, Yang L, Wang S. Thirunavukarasu A, Zhao Y, A review of digital twin technologies for enhanced sustainability in the construction industry. Buildings 14(4): 1113. https://doi.org/10.3390/buildings14041113.

Zhou Y, Liu J. Advances in emerging digital technologies for energy efficiency and energy integration in smart cities. Energy Build 315: 114289. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114289.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1622345

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 775-783/ May 2025

THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ETHYL VINYL ACETATE (EVA) / NANO-CLAYS OR SLAKED LIME COMPOSITES

İlker ERDEM[1]*, Şeyma AVCI[2]

[1]*Abdullah Gül University, Faculty of Engineering, Department of Materials Science and Nanotechnology Engineering, 38080, Kayseri, Türkiye*
[2]*Abdullah Gül University, Graduate School, Advanced Materials and Nanotechnology MSc Program, 38080, Kayseri, Türkiye*

Abstract: Ethyl vinyl acetate (EVA) is a widely used copolymer in various industrial applications. One concern about its utilization is its flammability as other polymeric materials. The inorganic fillers like clays, metal hydroxides (e.g. of Al, Mg), metal oxides (e.g. alumina) are evaluated as environmentally benign additives to enhance the flammability characteristics of the polymers. The composites prepared via these inorganic fillers should also be characterized by considering their required mechanical properties for specific applications. The possible utilization of different nano-clays (organically surface modified montmorillonite (MMT)) and "slaked lime" ($Ca(OH)_2$ without surface modification) was investigated in the current study. The nano-clay with exfoliated morphology in the EVA matrix was found to be more effective on both mechanical and flammability characteristics of EVA composites. $Ca(OH)_2$ was also moderately effective on mechanical and thermal characteristics of the EVA composite. The inorganic filler content of EVA composites may be increased for better flame-retardancy, but the mechanical properties should be investigated simultaneously.

Keywords: EVA, Flame-retardancy, Nano-clay, Slaked lime, Mechanical properties

***Corresponding author:** Abdullah Gül University, Faculty of Engineering, Department of Materials Science and Nanotechnology Engineering, 38080, Kayseri, Türkiye
E mail: ilker.erdem@agu.edu.tr (İ. ERDEM)
İlker ERDEM https://orcid.org/0000-0001-5743-0835
Şeyma AVCI https://orcid.org/0000-0003-1503-6412

Received: January 17, 2025
Accepted: March 26, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Erdem İ, Avcı Ş. 2025. Thermal and mechanical properties of ethyl vinyl acetate (EVA) / nano-clays or slaked lime composites. BSJ Eng Sci, 8(3): 775-783.

1. Introduction

Ethyl vinyl acetate (EVA) and its composites have been widely used in various industrial applications (Das et al., 2022; Guo et al., 2018; Jeong et al., 2022; Nyambo et al., 2009; Rafiee and Shahzadi, 2019; Rajczak et al., 2020; Ryu et al., 2020; Tambe et al., 2009). The good compounding properties of the copolymer makes its usage advantageous in different blends (Aghjeh et al., 2015). EVA may have varying acetic acid group (VA) content (10-40 % (Chuayjuljit and Worawas, 2011)) which may change its characteristics (e.g. crystallinity, mechanical behavior) (Díez et al., 2021; Luna et al., 2022). Higher VA% decreases the crystallinity of the polymer and increases the polarity of the copolymer, which results in varying characteristics (e.g. blending, mechanical properties) (Chaudhary et al., 2005; Luna et al., 2022). The increasing VA% and increasing polarity may be beneficial for blending of the copolymer with polar additives (e.g. inorganic fillers like clay) which may lead to better interaction and consequently enhanced mechanical properties for EVA/inorganic filler composites (Chaudhary et al., 2005).

The flammability of the polymers is one of the main drawbacks limiting their usage in different applications e.g. where the temperature may rise and creates a risk for ignition (Beyer, 2009; He et al., 2020; Rajczak et al., 2020). The researchers have been investigating additives to supply flame retardancy to the polymers. The conventional additives which contain halogens are not environmentally friendly and research effort is focused on more environmentally friendly options like inorganic fillers (e.g. oxides, hydroxides, borates) (Dinçer Fil et al., 2025; Dogan et al., 2021; Jeong et al., 2022; Xu et al., 2021). Nano materials with relatively larger surface areas may interact with the surrounding matrix more effectively and that makes their usage advantageous for the preparation of advanced composites. The nano-clay montmorillonite (MMT) is with a layered structure of alternating tetrahedral silicate (SiO_4^{4-}) and octahedral aluminum oxide-hydroxide ($[AlO_3(OH)_3]_6$) layers with nano thickness. These layers may be separated from each other under appropriate conditions, resulting in platelets with high aspect ratio and nano thickness (i.e. very high surface area). That layer-by-layer separation is called "exfoliation". The MMT when blended in a polymer matrix (e.g. EVA) may enhance the certain properties of the polymer (e.g. thermal and/or mechanical characteristics). The composites of clay/polymer are used in various industries aerospace, automotive, construction, packaging, water treatment, medical applications, electronics (Das et al., 2022; Guo et al., 2018; Rafiee and Shahzadi, 2019; Tambe et al., 2009).

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

There are different methods for inorganic filler (e.g. clay)/polymer composite preparation like melt-mixing at high temperature, solvent solution method and sol-gel technique (Das et al., 2022; Guo et al., 2018; Rafiee and Shahzadi, 2019; Ryu et al., 2020). In the solvent solution method, the polymer is dissolved in an appropriate solvent and inorganic filler is dispersed in it. It may result in homogeneously distributed inorganic filler in the composite after drying (evaporation of the solvent). It may assist the exfoliation of the clay, and the polymer may interact with the separate layers of the clay through a larger surface area. The other possible cases for interaction of the polymer and inorganic filler (e.g. clay) are "intercalated" and "agglomerated" morphologies (Figure 1). The polymer may cover the agglomerates of nano-clay (aggregated) or it may penetrate in between the layers of nano-clay (intercalated) or polymer (and solvent) may penetrate and separate the layers of nano-clay and clay platelets may be coated with polymer (exfoliated) (Guo et al., 2018; Rafiee and Shahzadi, 2019). The exfoliated morphology is expected to enhance the interaction of polymer and nano-clay and consequently may present enhanced properties for the composite material.

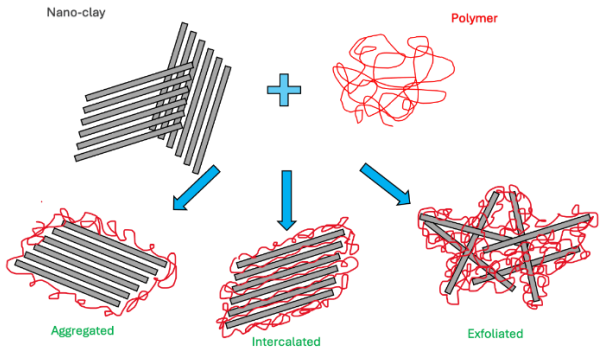


Figure 1. Possible morphologies for nano-clay/polymer blends.

Slaked lime ($Ca(OH)_2$) is a Ca compound taking part in the "lime cycle" (Figure 2). The other forms of Ca in the cycle are "quick lime" (CaO) and "limestone" ($CaCO_3$). Limestone may be extracted from the Earth's crust in certain regions in considerable quantities. The quick lime (CaO) can be prepared by heating the ground limestone ($CaCO_3$) at elevated temperatures (e.g. 900-1000 °C). Slaked lime ($Ca(OH)_2$) can be prepared by soaking the quick lime (CaO) in the water through an exothermic reaction. Like the other hydroxides (e.g., magnesium hydroxide (Mg(OH)2), aluminum tri hydroxide (Al(OH)3)), slaked lime (Ca(OH)2) can also serve as an inorganic filler for polymer composites. It may absorb the heat energy during burning of the composite to use it as latent heat to form quick lime (CaO) and water: $Ca(OH)_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow CaO + H_2O$. The heat removal decreases the temperature and hampers the burning of the composite. This endothermic reaction for $Ca(OH)_2$ takes place at temperatures above 400° C (Oualha et al., 2017). The water (vapour) produced during the oxidation of the slaked lime ($Ca(OH)_2$) dilutes the oxygen and flammable thermal degradation of the polymer, which also hampers the burning process. The quick lime (CaO) formed by oxidation may act as a heat/mass transfer resistance which will decrease the transfer of heat and oxygen and/or very flammable low molecular weight (MW) thermal degradation products. These mechanisms may make the slaked lime ($Ca(OH)_2$) a potential flame-retardant additive for polymer composites. The slaked lime ($Ca(OH)_2$) is relatively widely produced/used material in industrial applications and it may be supplied easily from different production routes. It is a candidate material for (thermochemical heat) energy storage and/or heat pump applications due to reversible (endo/exo-thermic) dehydration/hydration reaction (Gupta et al., 2021). Zheng et al. (Zheng et al., 2015) reported the energy storage efficiency of $Ca(OH)_2$ may be increased by preparing its nanocomposite with Zn. Other possible treatments/methods to enhance energy storage performance of $Ca(OH)_2$ were further discussed by Feng et al. (Feng et al., 2023). The slaked lime ($Ca(OH)_2$), as many other inorganic fillers (e.g. oxides, hydroxides), may affect the mechanical properties of the polymer matrix, too. The possible utilization of the slaked lime ($Ca(OH)_2$) as a halogen-free flame-retardant additive in polymer composites may be advantageous since it is already available and relatively affordable. Oualha et al. prepared EVA/($Ca(OH)_2$) and zinc borate composites with varying ($Ca(OH)_2$) content (e.g., 20, 40, 60%). They demonstrated the beneficial effect of ($Ca(OH)_2$) addition on the thermal stability of the EVA/($Ca(OH)_2$) composite due to the endothermic effect (Oualha et al., 2017).

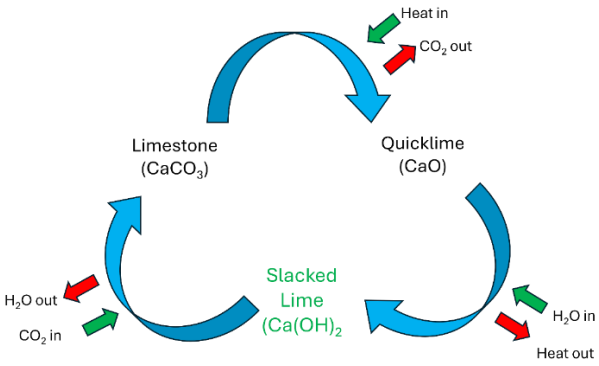


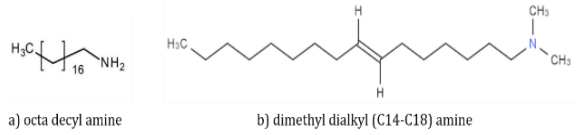
Figure 2. The lime cycle.

In this study, the potential of the nano-clays (commercial, with organic surface modifiers for enhanced interaction with polymer) and the slaked lime ($Ca(OH)_2$) (produced by soaking the quick lime (CaO) in water) as flame-retardant additives for an EVA copolymer was investigated. The effects of both the nano-clays and the slaked lime ($Ca(OH)_2$) addition on the mechanical properties of the EVA/inorganic filler composites were also estimated to comparatively investigate the potential enhancement/worsening effect of inorganic filler addition in the mechanical durability of the EVA composites. The

results are expected to contribute to the utilization of different inorganic fillers for the preparation of superior EVA composites which have versatile applications.

2. Materials and Methods

EVA (with 26 wt. % of VA) was kindly supplied by HES Cable Company (Kayseri, Türkiye). Two different commercial nano-clays from Sigma Co. Ltd. were used. Their surfaces were modified either with 15-35wt.% octadecylamine (Figure 3.a) and 0,5-5 wt.% aminopropyltriethoxysilane (product code 682632) or with 35-45 wt. % dimethyl dialkyl (C14-C18) amine (Figure 3.b) (the product code 682624). The quick lime (CaO) used in the study was from local market and it was "slaked" by soaking it in the tap water overnight. The slaked lime was dried at room temperature and ground before usage. Other chemicals and solvents were products of Merck Co. (Germany).



a) octa decyl amine b) dimethyl dialkyl (C14-C18) amine

Figure 3. Chemical structure of surface modifying compounds for nano-clays

The composites were prepared by solvent solution method. The EVA copolymer (10 phr (parts per hundred)) was dissolved in the organic solvent (chloroform, 100 phr) at elevated temperature (e.g. 40-50 °C) and inorganic fillers (either nano-clay 1 (product code 682632), or nano-clay 2 (the product code 682624), or the slaked lime (10 or 20 phr)) were added gradually. The mixture was kept heated and stirred overnight by using a magnetic stirrer. The mixtures were poured in the glass petri dishes and kept in the hood overnight to evaporate the solvent and prepare the EVA/inorganic filler composites. The samples were named with the abbreviation for the additive and its ratio (phr) e.g. NC-2.20 has 20 phr (parts per hundred) nano-clay 2 in the EVA copolymer. Slaked lime was named as "CaX". The dried composite films were cut to prepare samples for characterization experiments. The strips were cut with a length of 10 to 12.5 cm and a width of 1 to 1.25 cm which were used for tensile test or burning test. The remaining film samples were used for other characterization experiments.

The functional groups of the EVA/inorganic filler composites were analyzed using Fourier transform infrared spectroscopy with an Attenuated Total Reflectance unit (FTIR-ATR, Thermo Scientific Nicolet 6700). The crystallinity of the EVA composites was analyzed via X-Ray Diffraction (XRD) analysis (Bruker D8 Discover, 2θ: 0° to 50°, Cu Kα radiation (α = 0.15406 nm)). Thermal analysis of the composites was performed in the temperature range of 30-800 °C (with 10 °C/min heating rate under 20 mL/min nitrogen flow) (Perkin Elmer, STA 8000). The tensile properties of the neat EVA and the EVA/inorganic filler composites were determined using a Shimadzu AG-X 50kN universal testing instrument according to the ASTM D882 standard ((strain rate: 15 mm × s^{-1}). Samples prepared considering the UL-94 VTM standard were used for burning test. The time for burning of the sample strips with identical sizes was determined (including the 3 seconds ignition time).

3. Results and Discussion

3.1. FT-IR Analysis

The chemical bonding/structure of the neat EVA and EVA/inorganic filler composites were analyzed by using FT-IR analysis (Figure 4). The IR spectra of all samples with inorganic fillers are similar to that of the neat EVA copolymer. This indicates no new primary chemical bonding was formed in the composites among the copolymer and the inorganic fillers. The peaks on the IR spectra may be attributed to the EVA copolymer. The peaks observed for the samples were at wavenumber values of 719, 1019, 1237, 1371, 1464, 1733, 2848 and 2916 cm^{-1} with slight shifts. The peak at 719 and 1019 cm^{-1} were attributed to the C-H rocking and to the C-O stretching vibrations, respectively (Bartolomei et al., 2020). The peaks at 1237 cm^{-1} was attributed to vibrations related with C-O bonding (Bartolomei et al., 2020; Ye et al., 2013). The peaks at 1371 and 1464 were reported to be related with $-CH_3$ symmetric vibration and C-H bending vibrations, respectively (Bartolomei et al., 2020). The peak at 1733 cm^{-1} was attributed to the C=O vibration (Luna et al., 2022). The peaks at 2848 and 2916 cm^{-1} were attributed to $-CH_3$ symmetric stretching and C-H asymmetric stretching vibrations, respectively (Bartolomei et al., 2020). The IR absorption was reported for both inorganic fillers at wavenumbers 3620-3740 cm^{-1} attributed to the O-H stretching (Zhang et al. 2018; Harish et al., 2022; Akpomie and Dawodu, 2016; Shinde and Shirivastava, 2020), which was not observed in the EVA composites. The possible reason may be the abundance of EVA quantity in comparison to inorganic filler content.

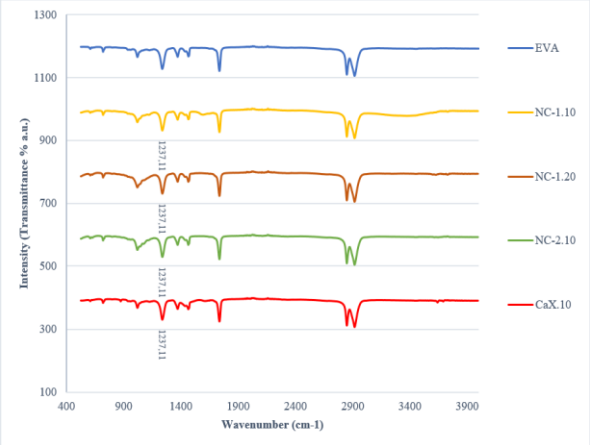


Figure 4. FT-IR data (IR spectra of the neat EVA and the EVA/inorganic filler composites.

The results are in accordance with the results by Bartolomei et al. (Bartolomei et al., 2020) who reported that the inorganic fillers didn't make any change in IR spectra of the composites, which was the case in the current study.

3.2. X-Ray Diffraction (XRD) Analysis

The X-ray diffractograms of the samples are shown in Figure 5. The characteristic peaks of EVA can be seen for all samples at 2 theta values of 21 and 23°, which are attributed to the planes (110) and (200) (Bartolomei et al., 2020; Díez et al., 2021). The CaX.10 sample has the characteristic peaks for $Ca(OH)_2$ (Portlandite, PDF no. 44-1481) at 18°, 28.7° and 34.1° 2 theta values, which are attributed to (001), (100) and (101) planes, respectively. This confirms the formation of "slaked lime" crystals (i.e. the formation of $Ca(OH)_2$ using quick lime (CaO) was successful). The nano-clay containing samples were lacking characteristic peaks of clay, only the sample NC-2.10 has a considerable peak at 2 theta value of 6.9° with relatively low intensity, which is indicating the presence of clay crystals which are in agglomerated or intercalated morphology. Peaks at 5.6° and 7.4° 2 theta values were reported for different MMT (montmorillonite) clays (Zhang et al., 2017). There is no considerable peak for NC-1 containing samples showing the nano-clay 1 is totally exfoliated, preventing the scattering of X-rays at certain angle(s).

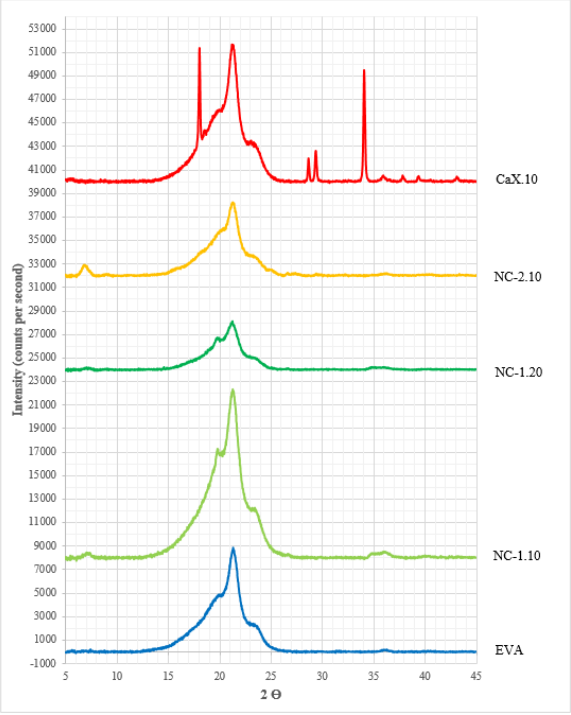


Figure 5. XRD diffractograms for the neat EVA (control) and EVA with different inorganic fillers.

3.3. Thermogravimetric Analysis (TGA/D-TGA)

The thermal behavior of the samples was characterized via TGA (Figure 6). The onset/off-set temperatures, remaining weight (residue %) at the end of the analysis and the temperatures for certain weight loss percentage values (5, 10 and 50%) were shown in Table 1 and 2.

The EVA copolymer has two step thermal degradation: i) deacetylation (removal of acetic acid groups), ii) defragmentation (breaking of the main backbone of the polymer chain) (Díez et al., 2021; Luna et al., 2022; Nyambo et al., 2009). The first step was reported to take place at 330-390 °C and second at 430 °C (Luna et al., 2022).

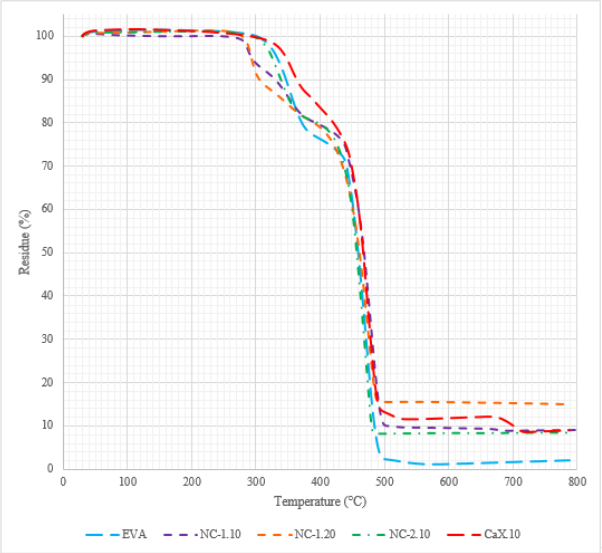


Figure 6. TGA data for the neat EVA (control) and the EVA/inorganic filler composites.

The nano-clays (NC-1 and 2) resulted in thermals instability for their EVA composites. The onset temperatures for thermal degradation were lower for the NC1.10 (onset T1: 280 °C) and NC-2.10 (onset T2: 314 °C) than the control (neat EVA) (onset T2: 326 °C), while the composite prepared via $Ca(OH)_2$ had a relatively higher onset temperature (onset T2: 341 °C) showing it makes the composite more resistant for thermal degradation initiation. It was reported the presence of $Ca(OH)_2$ hampers the deacetylation of EVA composites (the onset temperature was 350 °C for EVA with 20 phr $Ca(OH)_2$ which is in accordance with the current results) (Oualha et al., 2017). The lower onset temperature values for the composites with nano-clays may be related to the degradation of the surface modifying organics present in the nano-clays at considerable quantities (15-40 % for NC-1 and 35-45% for NC-2). The neat EVA lost 25% of its weight at this first step of thermal degradation while the composites with inorganic fillers had lower weight loss (%) values (around 20 % for the samples with nano-clays and only 16% for the sample with $Ca(OH)_2$).

The onset temperatures for the second step of thermal degradation (onset T3) were somehow similar for the neat EVA (449 °C), NC-1.10 (454 °C), NC-1.20 (447 °C) and CaX.10 (450 °C) while it was slightly lower for the sample NC-2.10 (441 °C). The weight loss (%) values for the second step were considerable for all samples; 73.6, 69.5, 65.4, 72.5 and 72.1 % for the samples neat EVA, NC-1.10, NC-1.20, NC-2.10 and CaX.10, respectively.

Table 1. The onset/offset temperatures, residue (mass %)

Sample	Onset T1	Δ1 (mass%)	Onset T2	Δ2 (mass%)	Onset T3	Δ3 (mass%)	Onset T4	Δ4 (mass%)	Offset T	Residue (mass %)
EVA	-	-	326.07	25.238	448.69	73.596	-	-	525.53	1.801
NC-1.10	280.29	7.465	334.75	13.159	454.41	69.538	-	-	533.24	9.669
NC-1.20	280.83	13.676	359.96	7.025	448	64.994	-	-	513.10	15.547
NC-2.10	-	-	314.40	20.175	441.38	72.514	-	-	494.68	8.223
CaX.10	-	-	340.59	15.825	454.75	71.184	675.12	3.483	730.98	8.665

Table 2. The certain weight loss (-5%, -10% and -50%) temperatures

Sample	T (-5%)	T (-10%)	T (-50%)
EVA	333.20	346.90	459.30
NC-1.10	293.70	329.90	468.50
NC-1.20	293.10	305.60	461.30
NC-2.10	325.50	338.90	457.00
CaX.10	347.30	363.60	467.10

Unlike the other samples (neat EVA and samples with nano-clays) the sample CaX.10 had another thermal degradation step with onset temperature (onset T4) and weight loss (%) value of 677 °C and 3.5%.

The offset temperature was higher for the control (neat EVA) (526 °C) than the composites NC-1.20 (513 °C), NC-2.10 (495 °C) and lower than NC-1.10 (533 °C) and CaX (731 °C). The remaining weight (residue %) values were 1.8, 9.7, 15.5, 8.2 and 8.6 for the neat EVA, NC-1.10 NC-1.20, NC-2.10 and CaX.10, respectively. These values are in accordance with the added inorganic filler contents. The residue (5) values were higher for the samples with 10 phr inorganic filler addition (NC-2.10 and CaX.10) and it was even higher for the composite with 20 phr inorganic filler (NC-1.20).

The TGA plots for the nano-clay containing samples are sharply becoming constant around 500 °C (Figure 6). But the plots for the sample CaX.10 the plots become constant more slowly which may be attributed to the formation and removal of H_2O through the reaction: $(Ca(OH)_2) + 1/2\ O_2 \rightarrow CaO + H_2O$, which was reported to take place around 510°C, which requires 148.6 kJ energy (for heating and decomposition) (Zheng et al., 2015) (104.4 kJ/mol (Feng et al., 2023). The defragmentation step of EVA (breaking of the polymer backbone) and dehydroxylation of $Ca(OH)_2$ (formation of CaO and water) may happen simultaneously at an overlapping temperature range (400-550 °C) (the second step observed at TGA). This reaction was reported to take place between 375 to 480 °C for the TGA of pure $Ca(OH)_2$ (Mirghiasi et al., 2014). The other thermal degradation step observed for the sample Ca.X.10 at elevated temperatures (onset T4: 677 °C) which may be attributed to the decomposition of $CaCO_3$ (calcite) to CaCO, which was reported to take place between 480 to 650 °C for the TGA of neat $Ca(OH)_2$ (Mirghiasi et al., 2014). Oulha et al. reported the onset T as 426 and 525 °C for the decomposition reactions of $Ca(OH)_2$ they produced via eggshell considering the TGA of neat $Ca(OH)_2$ (Oualha et al., 2017). They mentioned the possible exothermic contribution of $Ca(OH)_2$ at these temperatures hen used as additives in polymer composites (Oualha et al., 2017). The difference in the reaction temperatures for neat $Ca(OH)_2$ and its EVA composite (CaX.10) may be due to the presence of polymer (residue) which acts as an extra resistance for heat and mass transfer during TGA. Oulha et al. reported similar TGA results for EVA/$Ca(OH)_2$ composites, the offset temperature was above 800 °C for the EVA composite with 20 phr $Ca(OH)_2$ (Oualha et al., 2017).

The 5% weight loss was observed at 333, 294, 293, 326 and 347 °C for the neat EVA, NC-1.10, NC-1.20, NC-2.10 and CaX.10, respectively. A similar trend was observed for the T(-10%) values of the samples with the values 347, 330, 306, 339 and 364 °C for the neat EVA, NC-1.10, NC-1.20, NC-2.10 and CaX.10, respectively (Table 2). The 50% weight loss for the samples were observed at 459, 469, 461, 457 and 467 °C for the neat EVA, NC-1.10, NC-1.20, NC-2.10 and CaX.10, respectively. Considering all these temperatures (especially the T(-50%)) sample with 10 phr $Ca(OH)_2$ addition (CaX.10) had the highest values which indicates a better thermal stabilization in case of $Ca(OH)_2$ utilization (Ryu et al., 2020). NC 1.20 which had double amount of inorganic filler (20 phr nano-clay 2) had similar T(-50%) value with the sample CaX.10.

The derivative-TGA (D-TGA: % weight loss per time) data is shown in Figure 7 and the peak temperature values determined from them are shown in Table 3. There were 2 peak temperatures (peak T2 and T3) values in the same range for all samples. The values for peak T2 were around 351, 352, 343, 337 and 353 °C for the samples neat EVA (control), NC-1.10, NC-1.20, NC-2.10 and CaX.10, respectively (Table 3). The peak temperature decreased for the samples NC-1.20 and NC-2.10 (with surface-modified nano-clays) for this thermal degradation step of

the EVA copolymer, probably due to less thermostable organics used for their surface modifications.

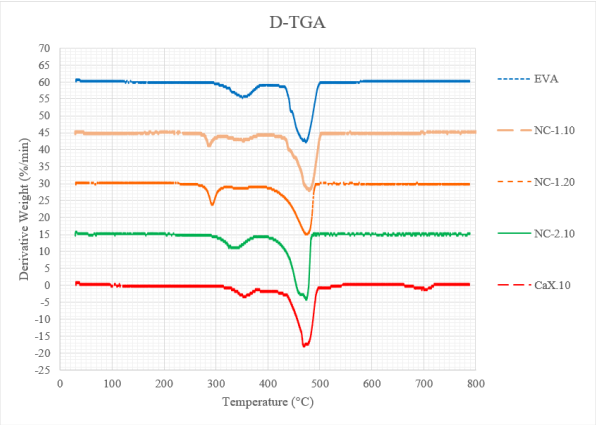


Figure 7. D-TGA data for the neat EVA (control) and the EVA/inorganic filler composites.

Table 3. The peak temperature values for D-TGA graphs for the control (neat EVA) and the EVA/inorganic filler composites

Sample	D-TGA Peak T1	D-TGA Peak T2	D-TGA Peak T3	D-TGA Peak T4
EVA	-	351.19	472.26	-
NC-1.10	285.27	351.98	480.29	-
NC-1.20	291.58	342.66	476.82	-
NC-2.10	-	336.59	473.92	-
CaX.10	-	353.36	470.37	704.63

$Ca(OH)_2$ added 10 phr without any organics slightly increased the peak temperature (peak T2), indicating some enhancement in thermal durability. The peak T3 values were around 472, 480, 477, 474 and 470 °C for the samples neat EVA (control), NC-1.10, NC-1.20, NC-2.10 and CaX.10, respectively (Table 3). For this step of thermal degradation, the nano-clays slightly increased the degradation peak temperature, which may be attributed to the possible extra heat/mass transfer resistance with addition of inorganic filler (nano-clay). The peak T3 value slightly decreased with the addition of $Ca(OH)_2$ (ΔT was 2 °C), which indicates the $Ca(OH)_2$ addition didn't enhance the durability at this step of degradation.

There were additional peak temperatures for the samples NC-1.10, NC-1.20 and CaX.10. The sample with 10 or 20 phr nano-clay 1 had a lower degradation peak temperature (peak T1, Table 3), which may be observed due to less thermal durability of the organic surface modifier used in nano-clay 1. Another additional peak temperature was present for the sample with 10 phr $Ca(OH)_2$ addition (CaX.10) which was around 705 °C (Table 3), which may be attributed to decomposition of calcite.

3.4. Tensile Test

The mechanical behavior of the composites and neat EVA was determined via tensile test and the stress-strain curves are shown in Figure 8. The inorganic fillers increased the stress-bearing capacity of EVA in general. The nano-clays were more effective in increasing the yield strength than the CaX. The type of nano-clay was effective on mechanical characteristics of the composite nano-clay 2 was more effective than nano-clay 1. The sample NC-2.10 (with 10 phr nano-clay 2) could bear higher stress than the samples NC-1.10 and NC-1.20 (with 20 phr nano-clay 2). The increasing amount of nano-clay didn't affect the stress bearing capacity considerably but increased the elongation (%) at break. CaX addition increased the stress bearing capacity slightly. The stress-strain curve of the sample CaX.10 was different than the other samples. At higher strain values the stress increased with a higher slope indicating the CaX showed a higher resistance in elongation at similar strain levels before fracture (which occurred at a relatively lower strain value than the other samples indicating a more brittle (i.e. less ductile) characteristic. The higher stress bearing capacity of the sample NC-2.10 can be attributed to its exfoliated morphology which increased the interaction between the organically surface modified nano-clay and the polymer matrix. CaX without any surface modification not that much effective as surface modified nano-clays up to certain stress values, but after certain strain values it was more resistive.

The Young's modulus values for the neat EVA (control) and composites with inorganic fillers are shown in Figure 9. The CaX addition increased the modulus 21%, while nano-clay addition increased more considerably. The modulus increased 71, 220, and 139% for the samples NC-1.10, NC-1.20 and NC-2.10, respectively. The nano-clay type and ratio were both effective in increasing the Young's modulus value of the EVA composite. More exfoliated nano-clay 2 resulted in a higher modulus value than both nano-clay 1 and CaX at similar ratio (10 phr). Increasing the organically surface-modified inorganic filler from 10 phr to 20 phr resulted in an 87% higher modulus.

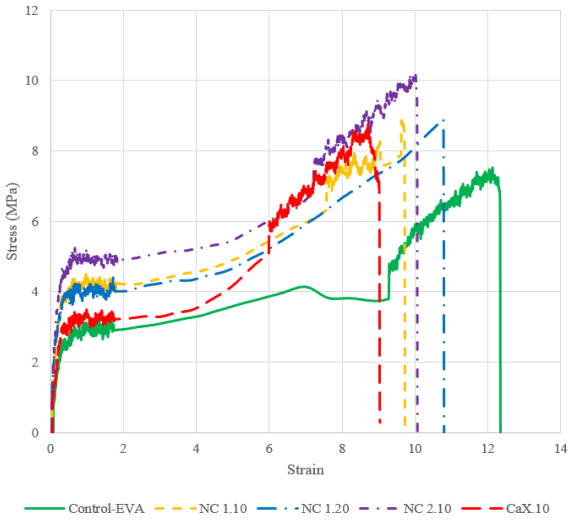


Figure 8. Tension test data for the neat EVA (control) and the composites.

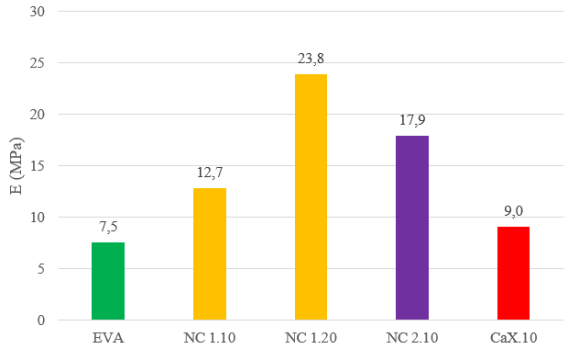


Figure 9. Young's Modulus values for the neat EVA (control) and the composites.

3.4. Burning Test

The neat EVA and its composites with inorganic fillers were burned considering the UL-94 VTM standard test. The samples were found to be non-self-distinguishing and there were drippings during burning (i.e. the samples failed the test). The burning times for total burning were recorded to compare the hampering effects of different inorganic fillers (Figure 10). The inorganic fillers increased the time for complete burning. The increase was 25% for CaX.10 and 38% for NC-2.10, while it was higher for samples with nano-clay 1 (64% and 105% for NC-1.10 and NC-1.20, respectively). Samples with nano-clay 1 with exfoliated morphology (i.e. well suspended platelets in the polymer matrix) resulted in a more efficient resistance for mass and heat transfer in the composite which increased the time for complete burning. The intercalated nano-clay 2 and CaX in the EVA composite also increased the burning time but less than the totally exfoliated nano-clay 1, showing the importance of distribution of inorganic filler in the polymer matrix. The inorganic filler content can be increased, and different fillers may be added simultaneously for possible enhancement in flame retardancy.

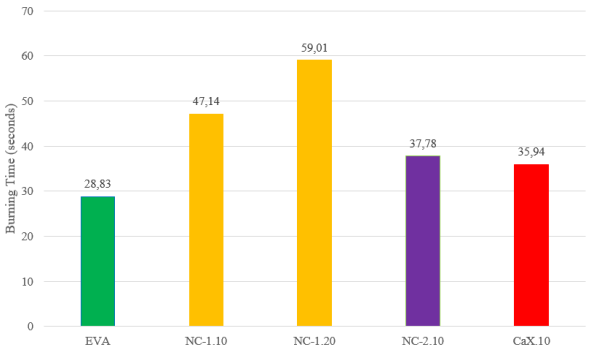


Figure 10. Burning time values for the neat EVA (control) and the composites.

4. Conclusion

EVA is one of the most widely used polymers in various industries. But its flammability is a drawback for applications where high temperatures or ignition risks are present. The inorganic fillers may be used to enhance the flammability characteristics of EVA composites, but the effect of inorganic filler addition on mechanical characteristics of the composite should also be considered. In this study organically surface-modified nano-clays and slaked lime ($Ca(OH)_2$) were used to prepare EVA composites and the change in thermal durability and mechanical characteristics were investigated.

The nano-clay type and ratio were effective on both mechanical and thermal characteristics of the EVA composites. NC-2.10 had the highest load-bearing capacity which has an intercalated morphology. It has the highest Young's modulus value among the samples with similar inorganic filler content (10 phr). The highest burning time was of the samples NC-1.10 and NC-1.20 (with 10 phr and 20 phr of nano-clay 1). The totally exfoliated morphology may be effective on having a more homogeneous structure in the composite and better resistance against mass and heat transfer resulting in longer burning times. $Ca(OH)_2$ was moderately effective on mechanical and thermal characteristics of the EVA composite. It slightly increased the Young's modulus (21%) and burning time (25%). The sample with $Ca(OH)_2$ (CaX.10) was with less ductility among all samples and its stress-bearing characteristics was different than the other samples. Possible contribution of surface modification for the slaked lime on its interaction with the polymer matrix may be investigated.

The incorporation of inorganic fillers into EVA copolymer increased the burning times of the resultant composites, but the samples did not exhibit self-extinguishing behavior. The filler content can be increased, and they may be used simultaneously for better flame-retardancy properties. The mechanical properties are considerably changing with the inorganic filler type and ratio. Therefore, the mechanical characterization should be performed for changing composite recipes, as well, to satisfy the criteria for specific applications.

Author Contributions

The percentages of the authors' contributions are presented below. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

	İ.E.	Ş.A.
C	100	0
D	100	0
S	100	0
DCP	50	50
DAI	50	50
L	60	40
W	60	40
CR	60	40
SR	90	10
PM	100	0
FA	100	0

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because there was no study on animals or humans.

Acknowledgements

Ethyl vinyl acetate (EVA) copolymer was kindly supplied by HES KABLO (Kayseri, TR).

References

Aghjeh MR, Nazari M, Khonakdar HA, Jafari SH, Wagenknecht U, Heinrich G. 2015. In depth analysis of micro-mechanism of mechanical property alternations in PLA/EVA/clay nanocomposites: A combined theoretical and experimental approach. Mater Des, 88: 1277-1289.

Akpomie KG, Dawodu FA. 2016. Acid-modified montmorillonite for sorption of heavy metals from automobile effluent. Beni-Suef Uni J Basic App Sci, 5: 1-12.

Bartolomei SS, Santana JG, Valenzuela Díaz FR, Kavaklı PA, Guven O, Moura EAB. 2020. Investigation of the effect of titanium dioxide and clay grafted with glycidyl methacrylate by gamma radiation on the properties of EVA flexible films. Radiat Phys Chem, 169: 107973.

Beyer G. 2009. Nanocomposites - a new class of flame retardants. Plastics Addit Compounding, 11(2): 16-21.

Chaudhary DS, Prasad R, Gupta RK, Bhattacharya SN. 2005. Clay intercalation and influence on crystallinity of EVA-based clay nanocomposites. Thermochim Acta, 433(1-2): 187-195.

Chuayjuljit S, Worawas C. 2011. Nanocomposites of EVA/polystyrene nanoparticles/montmorillonite. J Compos Mater, 45(6): 631-638.

Das P, Manna S, Behera AK, Shee M, Basak P, Sharma AK. 2022. Current synthesis and characterization techniques for clay-based polymer nano-composites and its biomedical applications: A review. Environ Res, 212: 113534.

Díez E, Rodríguez A, Gómez JM, Galán J. 2021. TG and DSC as tools to analyse the thermal behaviour of EVA copolymers. J Elastomers Plast, 53(7): 792-805.

Dinçer Fil S, Alp FB, Gönen M. 2025. Techno-economic analysis of zinc borate production from zinc oxide and boric acid. J Black Sea Eng Sci, 8(1): 119-127.

Dogan M, Dogan SD, Savas LA, Ozcelik G, Tayfun U. 2021. Flame retardant effect of boron compounds in polymeric materials. Compos B Eng, 222: 109088.

Feng Y, Li X, Wu H, Li C, Zhang M, Yang H. 2023. Critical review of Ca(OH)2/CaO thermochemical energy storage materials. Energies Basel, 16(7): 3019.

Guo F, Aryana S, Han Y, Jiao Y. 2018. A review of the synthesis and applications of polymer-nanoclay composites. Appl Sci Basel, 8(9): 1696.

Gupta A, Armatis PD, Sabharwall P, Fronk BM, Utgikar V. 2021. Thermodynamics of Ca(OH)2/CaO reversible reaction: Refinement of reaction equilibrium and implications for operation of chemical heat pump. Chem Eng Sci, 230: 116227.

Harish Kumar P, Soni A, Chakinala AG, Singhal R, Joshi RP, Mukhopadhyay AK. 2022. Effect of molarity on methylene blue dye removal efficacy of nano Ca(OH)2. ChemistrySelect, 7: e202200393.

He W, Song P, Yu B, Fang Z, Wang H. 2020. Flame retardant polymeric nanocomposites through the combination of nanomaterials and conventional flame retardants. Prog Mater Sci, 114: 100687.

Jeong SH, Park CH, Song H, Heo JH, Lee JH. 2022. Biomolecules as green flame retardants: Recent progress, challenges, and opportunities. J Clean Prod, 368: 133241.

Luna CBB, da Silva Barbosa Ferreira E, Siqueira DD, dos Santos Filho EA, Araújo EM. 2022. Additivation of the ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) with maleic anhydride (MA) and dicumyl peroxide (DCP): the impact of styrene monomer on cross-linking and functionalization. Polym Bull, 79(9): 7323-7346.

Mirghiasi Z, Bakhtiari F, Darezereshki E, Esmaeilzadeh E. 2014. Preparation and characterization of CaO nanoparticles from Ca(OH)2 by direct thermal decomposition method. J Ind Eng Chem, 20(1): 113-117.

Nyambo C, Kandare E, Wilkie CA. 2009. Thermal stability and flammability characteristics of ethylene vinyl acetate (EVA) composites blended with a phenyl phosphonate-intercalated layered double hydroxide (LDH), melamine polyphosphate and/or boric acid. Polym Degrad Stab, 94(4): 513-520.

Oualha MA, Amdouni N, Laoutid F. 2017. Synergistic flame-retardant effect between calcium hydroxide and zinc borate in ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA). Polym Degrad Stab, 144: 315-324.

Rafiee R, Shahzadi R. 2019. Mechanical properties of nanoclay and nanoclay reinforced polymers: A review. Polym Compos, 40(2): 431-445.

Rajczak E, Arrigo R, Malucelli G. 2020. Thermal stability and flame retardance of EVA containing DNA-modified clays. Thermochim Acta, 686: 178546.

Ryu HJ, Hang NT, Lee JH, Choi JY, Choi G, Choy JH. 2020. Effect of organo-smectite clays on the mechanical properties and thermal stability of EVA nanocomposites. Appl Clay Sci, 196: 105750.

Shinde SG, Shrivastava VS. 2020. Ni and Zn modified acid activated montmorillonite clay for effective removal of carbol fuchsin dye from aqueous solution. SN Appl Sci, 2: 519.

Tambe SP, Naik RS, Singh SK, Patri M, Kumar D. 2009. Studies on effect of nanoclay on the properties of thermally sprayable

EVA and EVAI coatings. Prog Org Coat, 65(4): 484-489.

Xu YJ, Qu LY, Liu Y, Zhu P. 2021. An overview of alginates as flame-retardant materials: Pyrolysis behaviors, flame retardancy, and applications. Carbohydr Polym, 260: 117827.

Ye L, Miao Y, Yan H, Li Z, Zhou Y, Liu J, Liu H. 2013. The synergistic effects of boroxo siloxanes with magnesium hydroxide in halogen-free flame retardant EVA/MH blends. Polym Degrad Stab, 98(4): 868-874.

Zhang H, Wang W, Li L, Liu J. 2018. Starch-assisted synthesis and characterization of layered calcium hydroxide particles. J Inorg Organometal Poly Mat, 28: 2399-2406.

Zhang X, Yi H, Bai H, Zhao Y, Min F, Song S. 2017. Correlation of montmorillonite exfoliation with interlayer cations in the preparation of two-dimensional nanosheets. RSC Adv, 7(66): 41471-41478.

Zheng M, Sun SM, Hu J, Zhao Y, Yu LJ. 2015. Preparation of nano-composite Ca2-αZnα(OH)4 with high thermal storage capacity and improved recovery of stored heat energy. Open Eng, 5(1): 42-47.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1600157

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 784-792 / May 2025

MECHANICAL STABILIZATION OF GRANULAR SOILS WITH CHICKEN FEATHER FIBER WASTE

Mitat ÖZTÜRK[1], Uğur Eren YURTCAN[2,3]*

[1]*Osmaniye Korkut Ata University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering, 80000 Osmaniye, Türkiye*
[2]*Bingöl University Vocational School of Technical Sciences, Department of Construction, 12000 Bingöl, Türkiye*
[3]*Bingöl University Centre for Energy, Environment and Natural Disasters, Bingöl, Türkiye*

Abstract: Taking into account that 26 billion chickens were produced worldwide in 2021, a total of 2.6 million tons of chicken feather waste is generated for consumed chickens. Methods such as burning and burying are commonly utilized for the disposal of chicken feather waste, especially burning pollutes the environment. Recently, it has been shown that organic fibers can be used as an alternative to synthetic fibers for soil improvement by reinforcing them. This study examined the usability of chicken feathers as an alternative to organic fibers. In this context, chicken feathers obtained from chicken production facilities were processed and chicken feather fibers were obtained. The sand soil reinforced with 0.2% and 0.4% fibers were tested in a direct shear test apparatus. The data obtained indicated an increase in peak shear strength values in the range of 16-25% and residual shear strength values in the range of 23.5-34.6%. The highest strength values were obtained with 0.2% reinforcement. According to findings, it was found that the soil has a saturation point in chicken feather fiber reinforcement and the amounts of fiber on it are of no benefit. In summary, chicken feathers that need to be discarded can be used as a promising soil stabilization method. Considering all these advantages, chicken feather fibers can be considered a favorable alternative for soil stabilization in terms of their contribution to both the economy and nature.

Keywords: Peak shear strength, Chicken feather fiber; Direct shear test, Friction angle

***Sorumlu yazar (Corresponding author):** Bingöl University Vocational School of Technical Sciences, Department of Construction, 12000 Bingöl, Türkiye.
E mail: ueyurtcan@bingol.edu.tr (U. E. YURTCAN)
Mitat ÖZTÜRK https://orcid.org/0000-0003-4685-7088
Uğur Eren YURTCAN https://orcid.org/0000-0001-5040-2786

Received: December 11, 2024
Accepted: March 27, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Öztürk M, Yurtcan UE. 2025. Mechanical stabilization of granular soils with chicken feather fiber waste. BSJ Eng Sci, 8(3): 784-792.

1. Introduction

Considering that the world population has increased from 1 billion to 8 billion in the last 75 years, it is not difficult to predict that the human population and its needs will continue to rise. According to the projection for 2030, this number is expected to increase by 10% to 9 billion (Brakman et al., 2025; Ghosh et al., 2024; United Nations (UN), 2024). As of 2022, 28 billion chickens were produced in the world. In Türkiye, as of 2023, annual chicken production will increase by 1.1% and reach 254 million units. 1.27 billion chickens were slaughtered and 2.3 million tons of chicken meat was produced in 2023 (Kadakoğlu et al., 2024; Republic of Türkiye Ministry of Agriculture and Forestry, 2024). Assuming that the average weight of a chicken is 2 kg and about 5% of its weight is feathers, a rough estimate would amount to 2.6 million tons of chicken feather waste in the world and about 36,000 tons in Türkiye. Burning, burying, and composting methods are used to dispose of these wastes. Any of these methods can lead to problems such as increased air pollution, increased soil pollution, reduced soil fertility, and groundwater contamination by causing excess nitrogen in the soil (Hancock et al., 1995; Depison et al., 2020; Latshaw and Bishop, 2001; Uzun, 2010). For this reason, the correct handling of chicken feathers, one of the wastes from chicken production, is becoming increasingly important and necessary. Problems related to the mechanical behavior of soils are known to be studied under two main headings: deformation and stability problems. In all categories of stability problems (bearing capacity problems, slope stability problems, etc.), which cover the majority of soil mechanical problems, the shear strength of the soil is crucial. If the problem caused by the soil-structure interaction in the system cannot be solved by changing the structural properties, an improvement in the soil parameters is sought. To increase the shear strength properties of the soil, solution methods such as soil improvement with cohesive material (chemical improvement), compaction, additive inclusion, thermoelectric methods (physical improvement) or improvement with various reinforcing elements such as geosynthetics and geocomposites (mechanical improvement) can be used (Bowles, 1996; Das and Sivakugan, 2017; Hausmann, 1989; Holtz et al., 2010; Ingles and Metcalf, 1973; Öztürk, 2024a; Öztürk, 2024b). There are many studies on the use of waste materials, especially in the chemical and mechanical stabilization categories. For example, many studies have been conducted on cohesion improvement of soils using waste materials such as fly ash, furnace slag, rice husk ash (RHA), sewage sludge ash, bottom ash, sugarcane straw ash,

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

copper slag, sawdust ash, and cement kiln dust as a cohesive waste alternative to materials such as lime and cement (Rahman et al., 2011; Syed Zuber et al., 2013; James and Pandian, 2015; Ahmed and Adkel, 2017; Singh et al., 2017; ; Zorluer and Gücek, 2017; Sudhakaran et al., 2018; Aamir et al., 2019; Jafer et al., 2020; Keleş et al., 2024). Reinforcement with fibers is one of the common methods of soil improvement by reinforcement. Soil improvements with steel reinforcements (e.g. approach embankments, reinforced earth walls) or geosynthetic products (Holtz et al., 1998; Koerner, 2005; Jones and Bell, 2013; Saran, 2017; Öztürk et al., 2024) (e.g. road embankments with geowalls or geosynthetics) are commonly used today (Hausmann, 1989; Koerner, 2012). In these processes, the reinforcement must be placed and compacted using special manufacturing techniques. Another and more practical approach to improving soil through reinforcement is to reinforce the soil with randomly distributed fibers. Recently, the subject of reinforcement with waste fibers has attracted attention and has been studied. For this purpose, synthetic waste fibers such as polypropylene, polyester, nylon, palm fibers, jute, coconut fibers, bamboo fibers and many natural fibers such as wool, hair and silk were examined. The investigations generally relate to the construction of cohesive fine-grained soils or mixed soils with a high proportion of fine-grained soils as embankments and the problems that arise. For this reason, general emphasis is placed on the mechanical behavior of reinforced soil samples as qualified filling (with Proctor test and unconfined compression test) or improving compression properties (with consolidation test) (Hejazi et al., 2012; Bordoloi et al., 2017; Yazıcı and Keskin, 2021; Zafar et al., 2023). Sandy soils have low water retention capacity (cohesive character), high permeability and are sensitive to compression. Reinforcement with fibers can be considered as a good option to eliminate the weak points in the mechanical behavior of sandy soils. The effect on the mechanical behavior of coarse-grained soils reinforced with fibers has been investigated to a lesser extent (Adlin Rose et al., 2022; Anagnostopoulos et al., 2013; Choobbasti et al., 2019; Darvishi and Erken, 2018; Islam et al., 2021; Liu et al., 2017; Noorzad and Zarinkolaei, 2015; Yetimoglu and Salbas, 2003). Adlin Rose et al. (2022) investigated improving the shear strength of sandy soils using chicken feathers. In their study, washed, air-dried and 5 mm long chicken feather fibers (CFF) were used to improve the mechanical behavior of poorly graded clean (SP) natural sand. To this end, the author investigated the improvement of soil shear strength by conducting a series of direct shear tests on samples obtained by mixing sandy soil with chicken feather fibers at different ratios between 0.25% and 3.0%. The maximum shear strength values of chicken feather enhanced samples ranging from 1.5% to 2.5% were found to be 61kPa, 103kPa and 159 kPa at normal stress values of 50 kPa, 100 kPa and 150 kPa, respectively. and the internal friction angle was 45°. Thus, the addition of CFF provided an improvement in shear strength by 50%, 32%, and 30% at normal stress values of 50 kPa, 100 kPa, and 150 kPa, respectively, and an increase in the internal friction angle by 13%. In this context, the principle of reinforcement with randomly distributed fibers was used to study how chicken feathers would affect the shear strength properties of the sandy soil, taking the studies carried out as a reference. Experiments were carried out by adding 60 mm long chicken feather fibers to the sand substrate in amounts of 0.2% and 0.4% by weight. The experimental results were examined in terms of load-deformation behavior, peak shear stress, friction angle and dilatation behavior for samples with and without additives. By conducting this comparative analysis, the study aimed to understand the effects of chicken feather additive on soil behavior and highlight the key differences in their behavior. Chicken feathers can be a favorable alternative as a fiber supplement as they provide increased strength, and the use of chicken feather fibers in waste management and recycling can help protect nature.

2. Materials and Methods

2.1. Soil Sample

In this study, as in many studies, poorly graded clean sand (SP) was used as a proxy for problematic sandy soils (Anagnostopoulos et al., 2013; Liu et al., 2017; Benziane et al., 2019). Specific gravity, grain size distribution and relative density tests were carried out to determine the index properties of the sand used (ASTM D4253-16e1, 2016; TS EN ISO 17892-3, 2016; TS EN ISO 17892-4, 2016). Information on the index properties of the soil is given in Figure 1 and Table 1.

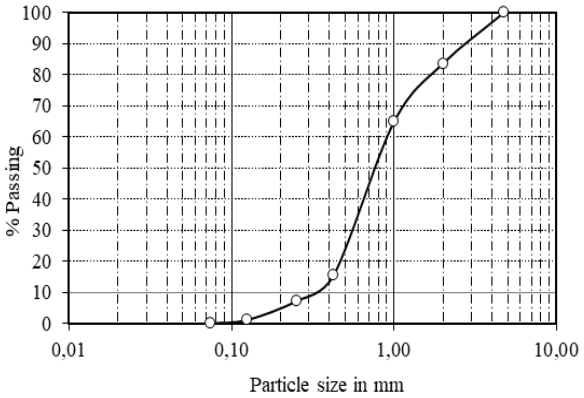


Figure 1. Particle sizes distribution.

Table 1. Characteristics of the soil

Properties	Value
Specific gravity, Gs	2.73
D_{10} (mm)	0.35
D_{30} (mm)	0.55
D_{60} (mm)	0.90
Coefficient of uniformity, Cu	2.57
Coefficient of curvature, Cc	0.96
Minimum dry density (kN/m^3)	15.15
Maximum dry density (kN/m^3)	17.20
Maximum void ratio, e_{max}	0.81
Minimum void ratio, e_{min}	0.59
Relative density (%)	80
Soil classification (USCS)	SP

2.2. Chicken Feather Fiber (CFF)

When soil stabilization studies with fibres are examined, although an increase in shear strength is observed as the fibre length increases, however, after a certain length of fibre, a decrease in shear strength is observed. This situation is justified by many authors because the locking mechanism between the strands of fibres above a certain length is adversely affected. However, the preferred length of fibre varies depending on the fibre type (Yazıcı and Keskin, 2021). Therefore, the fibre length chosen in our study was chosen according to an ideal average size which requires less processing and can be applied without the need to separate the hair from the fibre. Chicken feather fiber (CFF) was used for reinforcement. Chicken feathers were washed and air dried before experiments. Afterwards, they were cut to an average length of 60 mm. The prepared CFF samples are demonstrated in Figure 2. The shear strength parameters were studied to observe the improvement achieved by CFF in the sand sample. In many studies on the reinforcement of sand soils with fibers, samples were prepared by reinforcing them with different fibers in the range of 0.1 to 2% by weight (Anagnostopoulos et al., 2013; Benziane et al., 2019; Islam et al., 2021; Liu et al., 2017; Noorzad and Zarinkolaei, 2015; Yetimoglu and Salbas, 2003). Based on this, 0%, 0.2% and 0.4% fiber content by weight were used.



Figure 2. Prepared chicken feather fibers.

2.3. Method

Test samples were prepared with 0%, 0.2% and 0.4% fiber content and 80% relative density. Since the samples were prepared and tested in dry condition, no water was added to the shear box cell. Since larger fibers were used compared to the fiber size used in many studies, experiments were conducted using a large-sized shear box. Since the test equipment used transferred the horizontal deformation, vertical deformation and applied shear stress values read during the test to the computer with an automatic system, data loss was minimal during the test. Shear box tests were conducted by taking TS 1900-2/T3 (2019) as reference.Dried sand and CFF were randomly mixed and compacted into three layers and placed in the shear box to prepare the samples. The samples were cut in a cutting box with dimensions of 116x116x60 mm at a speed of 1 mm/min. The experiments were carried out under three different normal stresses of 29 kPa, 58 kPa and 116 kPa.

3. Results and Discussion

Many studies on fiber reinforcement have indicated that fiber reinforcement provides improvement in the shear strength parameters of the soil. For example, Yetimoglu and Salbas (2003) and Anagnostopoulos et al. (2013) did not observe a significant increase in peak shear strength in their studies with polypropylene fibers. Both studies have worked on poorly graded sand (SP) samples with polypropylene fibers (φ:0.03-0.05mm; l:12-20mm) in the range of 0.1-1.0% by weight. Although the normal stress values used do not fully coincide, they have tested their samples within the limits of 50-800kPa. While Anagnostopoulos et al. (2013) observed a decrease in cohesion value with fiber addition, Yetimoglu and Salbas (2003) did not observe a positive contribution. The authors observed a decrease in the friction angle value, although not at a significant level. While the authors did not express an opinion on the mechanism of this situation, Yetimoglu and Salbas (2003) stated that small-sized

experiments were insufficient to observe the fiber effect and that larger-sized fibers should be used.

Noorzad and Zarinkolaei (2015)also worked on poorly graded sand (SP) samples with polypropylene fibers (φ:0.03 mm; l:6, 12 and 18 mm) in the range of 0.1-1.0 wt%. For this purpose, they tested the samples with direct shear and triaxial compression tests. In the study, it was stated that fiber reinforcement generally increased the shear strength of the soil sample (the increase became more pronounced with the increase in vel if length in the range of 106-435%). However, it was stated that the peak strength ratio decreased as the normal pressure increased and that the fiber content increased. The author explained this situation by the fact that while the unreinforced soil already had high strength under high normal stress, the addition of fibers under low normal stress provided lower peak strength ratio and the interaction between the fiber and the soil decreased.

Benziane et al. (2019) also tested poorly graded polypropylene fibres (φ:0.03 mm; l:12 mm) on samples of sand (SP) with 0.1 - 1.0% by weight. The author also stated that a limited improvement in the shear strength has generally been achieved with increasing fibre content and an increase in the coherence and friction angle has also been observed. The author worked with relative densities of 30%, 50% and 80% and found that increasing relative density increased the interaction between fibre and soil. All three authors discussed in this paragraph have noted that with increasing fibre, residual shear strength increases. For example, at 80% relative density, peak and residual shear strengths were increased by about 20% Based on this, it can be concluded that the increase in normal stress increases the fiber-soil interaction and the use of large-sized fibers increases the shear strength by increasing the soil-fiber interaction.

Adlin Rose et al. (2022), studied poorly graded sand (SP) samples with chicken feather fibers (sorted as stem-feather and prepared in l:5mm length) in the range of 0.0-3.0% by weight. In the study, the maximum shear strength increased by 27% (σ=150kPa) - 56% (σ=50kPa) depending on the normal stress in the range of 1.5-2.5%. An increase of up to 13% was achieved in the friction angle.

3.1. Change in Shear Strength Values

Shear stress-horizontal displacement curves for the tests with and without CFF reinforcement are shown in Figure 3. In this study, an increase in peak and residual shear strength values was observed with fiber reinforcement. With 0.2% fiber reinforcement, peak shear strength values of 43 kPa, 75 kPa and 137 kPa; residual shear strength values of 39 kPa, 70 kPa and 121 kPa were obtained under normal stresses of 29 kPa, 58 kPa and 116 kPa, respectively. With 0.2% fiber addition, peak shear strength values increased by 16%, 29%, 24.5% and residual shear strength values increased by 34%, 34.6% and 23.5%, respectively. Increasing the CFF content to 0.4% did not provide a significant increase. Considering the studies mentioned in the previous paragraph, while no improvement was observed in two studies conducted with polypropylene fibers (Anagnostopoulos et al., 2013; Yetimoglu and Salbas, 2003), an increase of up to 20% was observed in one study (Benziane et al., 2019), and an increase of up to four times was observed in the other (Noorzad and Zarinkolaei, 2015) In the study conducted by Adlin Rose et al. (2022), with chicken feathers, an average of 30% improvement was achieved at very high fiber rates compared to our study. When compared to the findings obtained from our study, it is seen that a very good performance is achieved with a recycled organic and waste fiber compared to the studies conducted with synthetic fibers. The fact that similar performance was achieved with the use of chicken feathers at a lower weight compared to the study conducted with chicken feathers is also a positive gain. In addition, using the fiber sizes in larger sizes and as a whole will save on fiber processing processes.

Table 2. Summary of experimental data

	Amount of fiber by weight (%)	Shear Strength (kPa)						Friction Angle (°)	
		Peak			Residual			Peak	Residual
		29kPa	58kPa	116kPa	29kPa	58kPa	116kPa		
UR	0.0	37	63	110	29	52	98	38.6	32.9
0.2%CF	0.2	43	75	137	39	70	121	47.8	37.2
0.4%CF	0.4	45	76	132	40	75	121	43.6	36.7

When the other mentioned studies were examined, it was observed that in some studies, peak strengths increased with the increase in fiber (Yetimoglu and Salbas, 2003), while in some studies, although an increase in strength was observed at the beginning, a decrease in peak strengths was observed with the increase in fiber (Noorzad and Zarinkolaei, 2015). However, in this study, the highest peak and residual shear strength values were obtained at 116 kPa normal stress with 0.2% CFF reinforcement. The increase obtained by increasing fiber supplementation from 0.2% to 0.4% is not significant. Considering the curves in Figure 3, the highest stress value for each experiment was taken as peak shear stress and the stress value at the end of the experiment was taken as residual shear stress. Peak shear stress and residual shear stress values obtained from the experimental results are illustrated in Figure 4. It was stated that the reason for the increase in shear strength with fiber additive is based on the interaction between fiber and soil. The reason why the fiber additive rate we observed in our study did not provide a significant increase after 0.2% is that while the fiber-soil interaction reached the most ideal rate at a

certain fiber percentage, the increase in the subsequent fiber ratio negatively affects the fiber-soil interaction. For this reason, the idea that the fiber-soil interaction is shaped depending on the soil grain size and fiber type comes to mind. Therefore, it is recommended that the appropriate fiber size selection for each soil sample be tested and selected in applications related to fiber reinforcement.

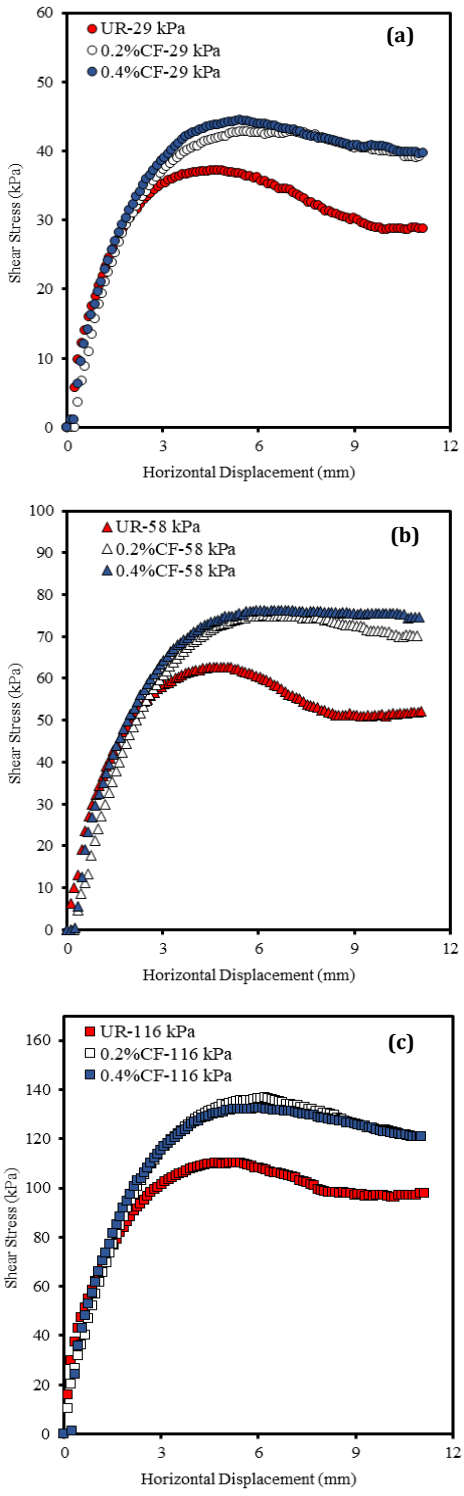


Figure 3. Load-deformation behavior of unreinforced, 0.2% CFF and 0.4% CFF reinforced specimens under different normal stresses (a) 29 kPa (b) 58 kPa (c) 116 kPa.

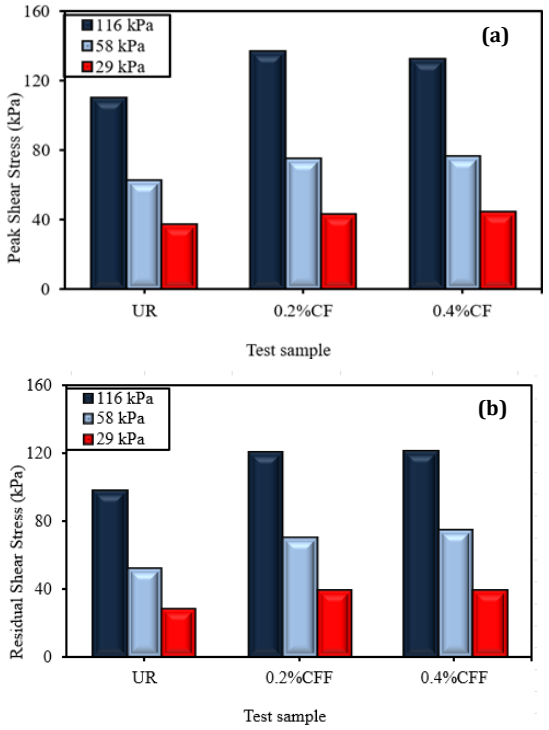


Figure 4. Shear strength values of the samples at different normal stresses (a) Peak shear stress (b) Residual shear stress.

3.2. Mohr Failure Envelopes and Friction Angle Variation

In most studies on reinforcing sands with fibers, the friction angle increased with increasing fiber reinforcement (Anagnostopoulos et al., 2013; Islam et al., 2021; Noorzad and Zarinkolaei, 2015). The results of Yetimoglu and Salbas (2003) are in the opposite direction. However, Yetimoglu and Salbas (2003) stated that fiber supplements only increased residual values.

The peak and residual friction angle values obtained from the experimental results are demonstrated in Figure 5. Additionally, Mohr failure envelope curves are given in Figure 6. In this study, the fracture envelopes of the samples with CFF reinforcement were positioned higher and with a greater slope. Therefore, with fiber reinforcement, an increase in both peak and residual friction angle values was observed along with the increase in shear strength. The highest friction angle values were observed at 0.2% fiber content. At 0.2% fiber content, the peak friction angle value increased from 38.6° to 47.8°; the residual internal friction angle value increased from 32.9° to 37.2°. With reinforcement, an increase of approximately 23.8% in peak friction angle value and approximately 19% in residual friction angle value was observed. Adlin Rose et al. (2022) observed that the friction angle increased by 13% from 39.9° to 45° by reinforcing a poorly graded sand soil (SP) with CFF. The effect of the increase in fiber content from 0.2% to 0.4% on the change of peak and residual friction angle is quite limited. It is known that the friction angle is a parametric expression of the mechanical interaction between soil grains. It is expected that the friction between grains will increase with the increase in fiber-soil interaction and therefore the increase in the

friction angle. The statement that the increase in shear strength with fiber contribution discussed in the previous paragraph is due to the interaction between fiber and soil is consistent with the findings of the friction angle change.

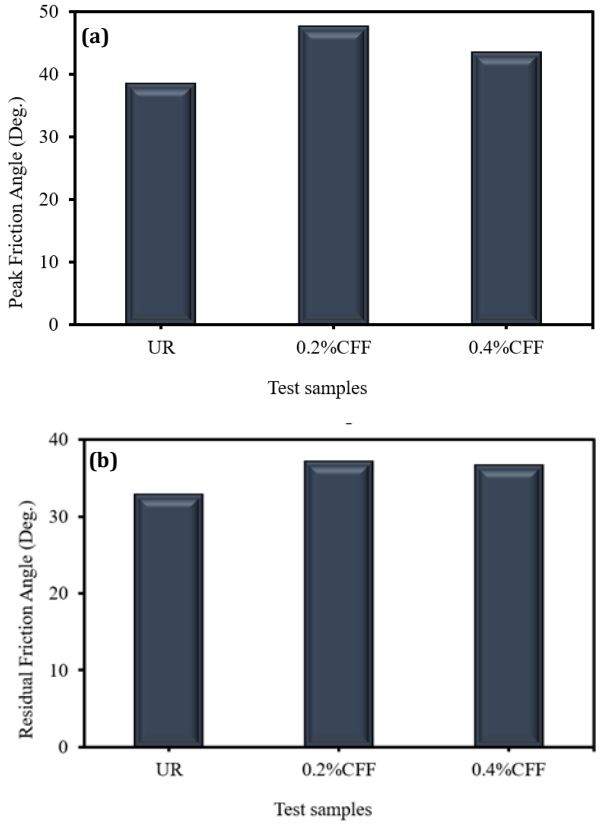


Figure 5. Friction angle values (a) Peak (b) Residual.

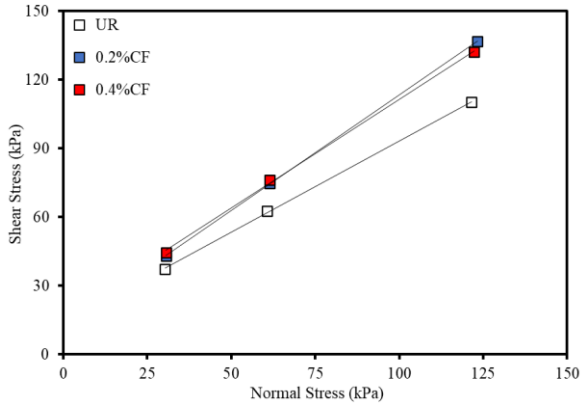


Figure 6. Mohr failure envelops for peak state values.

Benziane et al. (2019) stated that fiber reinforcement prevents expansion at low density ratios but increases it at high density ratios. Furthermore, many studies have been conducted at high density ratios and it has been observed that the expansion increases with increasing fiber reinforcement and normal stress (Anagnostopoulos et al., 2013; Benziane et al., 2019; Noorzad and Zarinkolaei, 2015). The vertical deformation-horizontal deformation curves obtained from the experiments are given in Figure 7. The findings in this study are consistent with the literature that expansion increases with increasing fiber reinforcement. While the increase in expansion is evident at low normal stresses, it loses its significance at high normal stresses. Our findings also indicate that the tendency of the soil to expand under the effect of shear forces increases with the increase in fiber content and normal stress. This indicates that the fibers increase the friction between the grains and cause the soil to behave as if it were in a more compact state than it actually is. For a better evaluation, the fiber effect should be monitored with visual monitoring tools. Considering the findings of this study and the literature, it is clearly revealed that the fibers mechanically strengthen the soil in terms of resistance to shear forces. However, both in the literature and in this study, it is important to emphasize the fact that peak and residual strength values can occur at different normal stresses or fiber ratios. It is clear that there will be differences in the unit volume weights of the fiber-sample mixtures, especially depending on the fiber unit volume weights. On the other hand, differences in fiber lengths, dimensions and textural properties cause the fiber-soil adhesion to vary with unit volume weight. Similarly, the increase in the expansion tendency of the samples with the addition of fibers is due to the same reasons. In other words, the sand matrix changes due to the fiber effect. Both the shear strength increases and the unit volume weight changes. Just as excess water prevents compressibility during compaction, fiber added beyond a certain amount reduces the mechanical strength of the soil rather than contributing. It would therefore make sense to determine the ideal amount of fiber in the laboratory when carrying out studies with fiber additives.

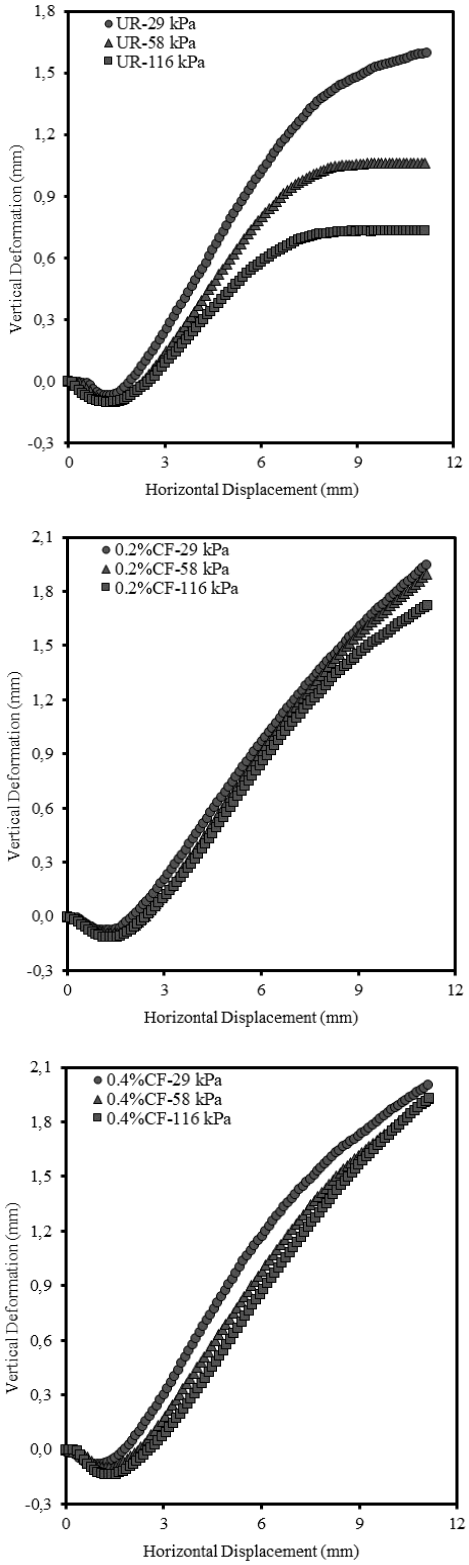


Figure 7. Variation of vertical displacement with respect to horizontal displacement.

4. Conclusion

The amount of waste feathers generated by chicken production and consumption reaches millions of tons worldwide. Disposal methods of waste chicken feathers harm nature and therefore human health. For this reason, waste chicken feathers need to be removed from nature and disposed of with sustainable approaches. In this study, the use of waste chicken feathers as soil improvement fiber was investigated by direct shear tests. The obtained results reveal that chicken feathers, which are increasingly becoming a burden on the environment, make sense to be used for soil reinforcement. It provides reinforcement as effective as synthetically produced polypropylene fibers. Once the appropriate amount of fiber for the soil is determined, it can be used with the highest benefit. To summarize all the results obtained in a few points:

- CFF fibers, like many other fibers, provide satisfactory mechanical strength increases.
  - With 0.2% fiber reinforcement, peak shear strength values of 43kPa, 75kPa and 137kPa; residual shear strength values of 39kPa, 70kPa and 121kPa were obtained under normal stresses of 29kPa, 58kPa and 116kPa, respectively. With 0.2% fiber addition, increases of 16%, 29%, 24.5% were observed in peak values and 34%, 34.6% and 23.5% in residual values, respectively.
  - At 0.2% fiber content, the peak friction angle value increased from 38.6° to 47.8°; the residual friction angle value increased from 32.9° to 37.2°.
  - Fiber reinforcement improved mechanical behavior. However, increasing fiber reinforcement from 0.2% to 0.4% did not provide significant improvement.
- As we recommend for many fibers, the best results can be achieved by determining the most appropriate amount of fiber for the soil to be reinforced based on normal loading.
- It offers a great advantage that the waste generated by eating chicken every year is disposed of in a natural way and has the power to compete with the synthetic fibers that are harmful to nature.

Finally, one of the problems with reinforcement using natural fibres is the time to degrade and the rate of degradation of natural materials. In almost all existing studies, degradation processes of natural materials in soil reinforcement with natural fibre studies were not investigated. Although this is a costly and time-consuming process, the investigation of the degradation processes of the materials used is itself a subject of research. This should be explored in future studies.

Author Contributions

The percentages of the authors' contributions are presented below. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

	M.Ö.	U.E.Y.
C	50	50
D	50	50
S	50	50
DCP	50	50
DAI	50	50
L	50	50
W	50	50
CR	50	50
SR	50	50
PM	50	50
FA	50	50

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans.

Acknowledgement

The authors thanks to Beyza Piliç company for supply of chicken feather.

References

Aamir M, Mahmood Z, Nisar A, Farid A, Ahmed Khan T, Abbas M, Ismaeel M, Shah SAR, Waseem M. 2019. Performance evaluation of sustainable soil stabilization process using waste materials. Proces, 7: 378.

Adlin Rose R, Subramanian M, Elakkiyadasan R, Siva M, Manoj Kumar P. 2022. Strength characteristics of sand modified with keratinous chicken feather fiber. Mater Today Proc, 62: 3935-3939.

Ahmed MD, Adkel AM. 2017. Stabilization of clay soil using tyre ash. J Eng, 23: 34-51.

Anagnostopoulos CA, Papaliangas TT, Konstantinidis D, Patronis C. 2013. Shear strength of sands reinforced with polypropylene fibers. Geotech Geol Eng, 31: 401-423.

ASTM D4253-16e1. 2016. Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. ASTM Int, West Conshohocken, PA, USA, pp: 125.

Benziane MM, Della N, Denine S, Sert S, Nouri S. 2019. Effect of randomly distributed polypropylene fiber reinforcement on the shear behavior of sandy soil. Stud Geotech Mech, 41: 151-159.

Bordoloi S, Garg A, Sekharan S. 2017. A review of physio-biochemical properties of natural fibers and their application in soil reinforcement. Adv Civ Eng Mater, 6: 323-359.

Bowles JE. 1996. Foundation analysis and design. McGraw-Hill Companies, Inc, New York, USA, pp: 148.

Brakman S, Kohl T, van Marrewijk C. 2025. DemoGravity: world population and trade in the 21st century. Rev Int Econ, 33(2): 486-501.

Choobbasti AJ, Kutanaei SS, Ghadakpour M. 2019. Shear behavior of fiber-reinforced sand composite. Arab J Geosci, 12: 157.

Darvishi A, Erken A. 2018. Effect of polypropylene fiber on shear strength parameters of sand. Proc 3rd World Congr Civ Struct Environ Eng (CSEE'18), ICGRE, 123.

Das BM, Sivakugan N. 2017. Fundamentals of geotechnical engineering. Cengage Learn, Boston, USA, pp: 800.

Depison D, Puteri NI, Gushairiyanto G. 2020. Growth patterns, body weight, and morphometric of KUB chicken, Sentul chicken and Arab chicken. Bull Peternak, 44.

Ghosh A, Kumar A, Biswas G. 2024. Exponential population growth and global food security: challenges and alternatives. In: Bioremediation of Emerging Contaminants from Soils. Elsevier, 1-20.

Hancock CE, Bradford GD, Emmans GC, Gous RM. 1995. The evaluation of the growth parameters of six strains of commercial broiler chickens. Br Poult Sci, 36: 247-264.

Hausmann MR. 1989. Engineering principles of ground modification. McGraw-Hill College, Sydney, pp:120.

Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Abtahi SM, Zadhoush A. 2012. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. Constr Build Mater, 30: 100-116.

Holtz RD, Christopher BR, Berg RR. 1998. Geosynthetic design and construction guidelines. Participant notebook. NHI Course No. 13213 (revised April 1998).

Holtz RD, Kovacs WD, Sheahan TC. 2010. An introduction to geotechnical engineering. 2nd ed. Pearson, New Jersey, pp: 864.

Ingles OG, Metcalf JB, 1973: Soil stabilization principles and practice. John Wiley & Sons, London, pp: 374.

Islam N, Ahmed N, Akter S, Hossain ASMF. 2021. Sandy soil stabilization using jute fiber as admixture. J Geotech Stud, 6: 30-34.

Jafer H, Majeed Z, Dulaimi A. 2020. Incorporating of two waste materials for the use in fine-grained soil stabilization. Civ Eng J, 6: 1114-1123.

James J, Pandian PK. 2015. Soil stabilization as an avenue for reuse of solid wastes: a review. Acta Tech Napocensis: Civ Eng Archit, 58: 50-70.

Jones CJFP, Bell FG. 2013. Earth reinforcement and soil structures. Butterworths Adv Ser Geotech Eng, Butterworth-Heinemann, pp:65.

Kadakoğlu B, Bayav A, Karli B. 2024. Türkiye'de kümes hayvancılığının mevcut durumu ve gelişimi. In: Int Conf Global Pract Multidiscip Sci Stud-VIII, Dubai, 325-335.

Keleş D, Balcı D, Taşdemir M, Ulutaş E. 2024. Polipropilen + %20 kenevir takviyeli / çörek otu / maleik anhidrit aşılı polipropilen polimer kompozitinin fiziksel özelliklerinin incelenmesi. Gazi Univ J Sci Part C: Des Technol, 12: 464-474.

Koerner RM. 2005. Designing with geosynthetics. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, pp:52.

Koerner RM. 2012. Designing with geosynthetics. 6th ed. Xlibris Corp, New Jersey, pp: 418.

Latshaw JD, Bishop BL. 2001. Estimating body weight and body composition of chickens by using noninvasive measurements. Poult Sci, 80: 868-873.

Liu J, Feng Q, Wang Y, Bai Y, Wei J, Song Z. 2017. The effect of polymer-fiber stabilization on the unconfined compressive strength and shear strength of sand. Adv Mater Sci Eng, 2017: 1-9.

Noorzad R, Zarinkolaei STG. 2015. Comparison of mechanical properties of fiber-reinforced sand under triaxial compression and direct shear. Open Geosci, 7: 547-558.

Öztürk M. 2024a. Effect of aperture size on the interface shear behavior of gridded cementitious geocomposite on sand soil with different relative densities. Constr Build Mater, 432: 136653.

Öztürk M. 2024b. Strength characteristics of lightweight soil with waste modified expanded polystyrene particles. Constr Build Mater, 442.

Öztürk M, Altay G, Kayadelen C. 2024. Assessment of the utilization of cement-treated geotextile as a reinforcement element for highway base layer under cyclic loading. Transp Geotech, pp:48.

Rahman MK, Rehman S, Al-Amoudi OSB. 2011. Literature review on cement kiln dust usage in soil and waste stabilization and experimental investigation. Int J Res Rev Appl Sci, 7: 77-87.

Republic of Türkiye Ministry of Agriculture and Forestry. 2024. Republic of Türkiye Ministry of Agriculture and Forestry. Poultry farming situation forecast report (accessed date: February 27, 2025) at https://arastirma.tarimorman.gov.tr/tepge/Belgeler/PDF%20Durum-Tahmin%20Raporlar%C4%B1/2024%20Durum-Tahmin%20Raporlar%C4%B1/K%C3%BCmes%20Hayvanc%C4%B1l%C4%B1%C4%9F%C4%B1%20Durum%20Tahmin%20Raporu%202024-402%20TEPGE.pdf.

Saran S. 2017. Reinforced soil and its engineering applications. IK Int Pvt Ltd., Delhi, India, pp:125.

Singh M, Sharma R, Abhishek A. 2017. Soil stabilization using industrial waste (wheat husk and sugarcane straw ash). Int Res J Eng Technol, 4: 589-596.

Sudhakaran SP, Sharma AK, Kolathayar S. 2018. Soil stabilization using bottom ash and areca fiber: experimental investigations and reliability analysis. J Mater Civ Eng, 30: 04018169.

Syed Zuber SZ, Kamarudin H, Mustafa A, Abdullah MMAB, Binhussain M, Salwa M. 2013. Review on soil stabilization techniques. Aust J Basic Appl Sci, 7: 258-265.

TS 1900-2/T3. 2019. Methods of testing soils for civil engineering purposes in the laboratory - Part 2: Determination of mechanical properties. Turk Stand Enst, Ankara.

TS EN ISO 17892-3. 2016. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 3: Determination of particle density. Turk Stand Inst, Ankara, Türkiye, pp: 28.

TS EN ISO 17892-4. 2016. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 4: Determination of particle size distribution. Turk Stand Inst, Ankara, Türkiye, pp: 53.

United Nations (UN). 2024. United Nations (UN) - World population prospects. URL: https://population.un.org/wpp/graphs (accessed date: February 27, 2025).

Uzun M. 2010. Tavuk tüyü ile dünyayı kurtarmak. Bilim Tek E-Derg, 2010: 82-85.

Yazıcı MF, Keskin SN. 2021. A review on soil reinforcement technology by using natural and synthetic fibers. Erzincan Univ J Sci Technol, 14(2): 631-663.

Yetimoglu T, Salbas O. 2003. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. Geotext Geomembr, 21: 103-110.

Zafar T, Ansari MA, Husain A. 2023. Soil stabilization by reinforcing natural and synthetic fibers - a state of the art review. Mater Today Proc, 2023: 1-10.

Zorluer İ, Gücek S. 2017. Usage of fly ash and waste slime boron for soil stabilization. Period Eng Nat Sci, 11(1): 15-19.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1569246

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)
Cilt 8 - Sayı 3: 793-798 / Mayıs 2025
(Volume 8 - Issue 3: 793-798 / May 2025)

CAM ELYAF/POLİPROPİLEN MELEZ İPLİKLERİNDEN ELYAF SARMA YÖNTEMİYLE KOMPOZİT BORU ÜRETİMİ

Aylin ALTINBAY[1]*, Mustafa DOĞU[2], Ahmet ÜNAL[1]

[1]*Yildiz Technical University, Faculty of Chemical and Metallurgical Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 34220, Istanbul, Türkiye*
[2]*Mir Arastirma ve Gelistirme Inc., Istanbul University Entertech Teknopark, No: 37/1(51), 34320, Istanbul, Türkiye*

Özet: Polipropilen (PP), otomotiv, ambalaj, ev eşyaları ve tekstil endüstrisi gibi pek çok alanda kullanılan termoplastik bir polimer türüdür. Boru sektöründe de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bunun başlıca nedeni metallerde olduğu gibi korozyon oluşmaması ve buna karşı ek bir korumaya ihtiyaç duyulmamasıdır. Bu sayede çelik ve çimento sistemlerinin yerini almaktadır. Boru sistemlerinde kompozit malzemelerin kullanılması daha hafif ve ince yapılar sağlamakta ve maliyetleri azaltmaktadır. Ancak, özellikle boru çapları büyüdükçe, kompozit yapı gerekliliği artmaktadır. Bu amaçla termoset kompozitler kullanılsa da PP kompozitlerin bunlara göre birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlar yüksek dayanım, hafiflik, yüksek kimyasal direnç, düşük su emilimi, düşük maliyetli ve geri dönüşüm kabiliyetidir. Ancak PP kompozit üretimindeki temel sorun fiber-matris arayüzey oluşumudur. Bu sorunun üstesinden gelmek için melez iplikler geliştirilmiştir. Çeşitli türleri olmakla birlikte genel olarak takviye elyaf ve polimer elyaf karışımlarından oluşmaktadırlar. Bu sayede, sıcaklık altında işlenmesi sırasında polimer elyaf ergiyip takviye elyafları içine daha iyi emdirilebilir. Bu çalışmada cam elyaf takviyeli PP borular elde etmek amacıyla elyaf sarma işlemi uygulanmıştır. PP'yi daha kolay takviyelendirmek için cam elyaf/PP melez iplikler kullanılmıştır. Geleneksel olarak termosetlerin işlenmesinde kullanılan elyaf sarma işlemi, ısı ve basınç sistemleri ilavesiyle melez iplikler için modifiye edilmiştir. Helisel ve çevresel sarım teknikleri, ayrıca bunların kombinasyonu uygulanmıştır. Üretilen borulardan çevresel ve eksenel yönlerde numuneler alınmıştır. Çekme, eğme ve darbe testleri yapılarak, sonuçlar takviyesiz borular ile karşılaştırılmıştır. Üretilen tüm melez iplikli borular takviyesiz boruya göre daha yüksek modül ve dayanım göstermiştir. Genel olarak kombinasyonlu sarım tekniğiyle üretilen kompozit borudan özellikle çevresel yönde en yüksek sonuçlar alınmıştır.

Anahtar kelimeler: Termoplastik kompozit, Melez iplik, Polipropilen, Boru, Mekanik özellikler

Thermoplastic Composite Pipe Production from Glass Fiber/Polypropylene Hybrid Yarns using Filament Winding Method

Abstract: Polypropylene (PP) is a type of thermoplastic polymer used in many areas such as automotive, packaging, household goods and textile industries. It has also begun to be widely used in the pipe industry. The main reason for this is that corrosion does not occur as in metals and there is no need for additional protection against it. Thus, it replaces steel and cement systems. The use of composite materials in piping systems provides lighter and thinner structures and reduces costs. However, the composite structure is necessary, especially when pipe diameters increase. Although thermoset composites are used for this purpose, PP composites have many advantages over them. These are high strength, lightness, high chemical resistance, low water absorption, low cost and recyclability. However, the main problem in PP composite production is fiber-matrix interface formation. Hybrid yarns have been developed to overcome this problem. Although there are various types, they generally consist of mixtures of reinforcement fibers and polymer fibers. Thus, polymer fibers can melt and be better absorbed into the reinforcement fibers during processing under temperature. In this study, the filament winding process was applied to obtain glass fiber reinforced PP pipes. Glass fiber/PP hybrid yarns were used to reinforce PP more easily. The filament winding process, traditionally used to process thermosets, has been modified for hybrid yarns with the addition of heat and pressure systems. Helical and circumferential winding techniques, as well as combinations of these, have been applied. Samples were taken from the produced pipes in circumferential and axial directions. Tensile, bending and impact tests were performed, and the results were compared with unreinforced pipes. All hybrid yarn pipes produced showed higher modulus and strength than unreinforced pipes. In general, the highest results were obtained from the composite pipe produced with the combination winding technique, especially in the environmental direction.

Keywords: Thermoplastic composite, Commingled yarn, Polypropylene, Pipe, Mechanical properties

***Sorumlu yazar (Corresponding author):** Yildiz Technical University, Faculty of Chemical and Metallurgical Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 34220, Istanbul, Türkiye
E mail: aylin.altinbay@yildiz.edu.tr (A. ALTINBAY)
Aylin ALTINBAY https://orcid.org/0000-0003-2356-1452
Mustafa DOĞU https://orcid.org/0000-0003-1258-7702
Ahmet ÜNAL https://orcid.org/0000-0002-0069-8061

Gönderi: 17 Ekim 2024 **Received:** October 17, 2024
Kabul: 28 Mart 2025 **Accepted:** March 28, 2025
Yayınlanma: 15 Mayıs 2025 **Published:** May 15, 2025

Cite as: Altınbay A, Doğu M, Ünal A. 2025. Thermoplastic composite pipe production from glass fiber/polypropylene hybrid yarns using filament winding method. BSJ Eng Sci, 8(3): 793-798.

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

1. Giriş

Ticari bir polimer olan polipropilen yüksek süneklik ve tokluk gösteren, su emmesi, yoğunluğu ve maliyeti düşük termoplastik türü bir polimerdir (Gahleitner vd., 2019). Geri dönüştürülebilir olması da önemli bir avantajdır. Bu avantajları sayesinde otomotiv, ambalaj, ev eşyaları ve tekstil endüstrisi gibi pek çok sektörde kullanımı olmakla birlikte boru sistemlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Alsabri ve Al-Ghamdi, 2020; Domaneschi, 2012; Litvinov ve Soliman, 2005; Walsh, 2011). Boru üretiminde dökme demirler, düşük ve orta karbonlu çelikler (st37, st44) ve boru çelikleri (X60, X70, X80, vb) kullanılmaktadır (Wasim vd., 2018; Akhmetov vd., 2018; Rachmawati vd., 2022; Ohaeri vd., 2018). Ancak korozyon sorunları yaşanması ve korozyondan korumaya ihtiyaç duyulmasından ötürü boru sektöründe geleneksel olarak kullanılan demir esaslı sistemlerinin yerini polimer malzemeler almaktadır. Isı ve kimyasal direncinin yüksek olması nedeniyle çeşitli kimyasallar, atık su ve tehlikeli atıkların yanı sıra içme suyu taşımacılığında da kullanılabilir (Boragno vd., 2017; Connell vd., 2016; Hametner, 1999). Ayrıca hafif ve esnek olduğundan makaralara sarılarak taşınması kolaydır (Cao vd., 2017; Hastie vd., 2022). Bunun yanı sıra termoplastik olmalarından dolayı alın kaynağı ile birleştirilebilir (Balkan vd., 2008; Barber ve Atkinson, 1974).

Bu tür boruların imalatında ekstrüzyon prosesi kullanılırken (Huang vd., 2000; Poungthong vd., 2018; Yu vd., 2014), bağlantı parçaları imalatında enjeksiyon kalıplama kullanılmaktadır (Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality, 2016; Gebrehiwot ve Espinosa-Leal, 2022; Pontes ve Pouzada, 2004). Her iki işlemde de PP eritmekte ve daha sonra eriyik açık veya kapalı kalıplara itilmektedir. Bu işlemler sırasında, ürünlerin özelliklerini iyileştirmek için bazı dolgu maddeleri veya süreksiz fiber eklenebilir (Bush, 1999; Delli vd., 2021; Mattausch, 2015; Moussa vd., 2022; Singer vd., 2021). Ancak süreksiz fiber takviyeli kompozitlerde mekanik özellikler fiber boy oranı ile ilişkilidir. Örneğin, Deng vd. 0.5–1.0 mm uzunluktaki süreksiz fiber katkılı PP borularda en fazla yaklaşık 40 MPa çekme dayanımı elde edebilmiştir (Deng vd., 2019). Daha yüksek mekanik performans için sürekli elyaflarla takviyelendirme gerekmektedir (Vaneker, 2017). Boruların takviyelendirilmesinde elyaf sarma yöntemi bunun için en uygun işlemlerden biridir (Yu vd., 2017). Geleneksel olarak termoset türü reçine ile ıslatılan elyaflar dönen hareketli bir mandrel üzerine sarılarak üretim yapılmaktadır. Ancak termoplastik kompozit üretimi için bu işlemin modifiye edilmesi gereklidir. Bunun için hareketli mandrele termoplastikten bir taban astarı yerleştirilip, üzerine elyaflar sarılabilir (Bai vd., 2015; Gibson A G, 2003; Rafiee ve Mazhari, 2016; Yu vd., 2015b). Sarma işleminde önceden termoplastik polimer emdirilmiş prepreg veya melez ipliklerin kullanılması fiber-matris arayüzeyi gelişmiş ürünler elde etmek için daha uygundur (Yu vd., 2015b). Sarımla eş zamanlı olarak ısı ve basınç uygulaması da gereklidir (Alabtah vd., 2021; Lou vd., 2020). Isıtıcı nozulunun sıcaklığı, sıkıştırma silindiri basıncı ve mandrel dönüş hızı fiber-matris konsolidasyonu için kritik proses parametreleridir (Karbuz vd., 2024). Son olarak ekstrüzyon kaplama veya film kaplama ile proses tamamlanmalıdır (Alabtah vd., 2021; Lou vd., 2020; Yu vd., 2015a). Termoplastikler için geliştirilmiş bu modifiye elyaf sarma prosesi ile ikincil bir konsolidasyon adımı ortadan kaldırılarak yerinde konsolidasyon sağlanmıştır (Özbay vd., 2020; Karbuz vd., 2024)

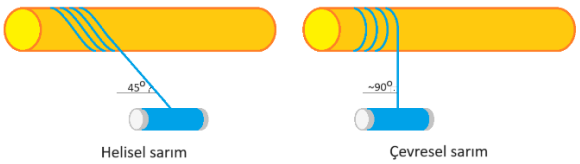
Melez iplikler, takviye ve termoplastik polimer elyafı karışımdan oluşan iplik demetleridir ve ergitildiğinde polimerin homojen bir şekilde takviye elyaflara emdirilmesine olanak tanımaktadır (Ford, 2004; Friedrich, 1999; Lynam vd., 2014; Selver ve Potluri, 2017). Bu sayede elyaf sarma veya otomatik elyaf yerleştirme gibi proseslerde gelişmiş arayüzeye sahip ürün elde etmekte kullanılabilir (Boon vd., 2021).

Bu çalışmanın amacı sürekli E-cam takviyeli PP boru üretmek ve mekanik performanslarını değerlendirmektir. Bunun için cam elyaf/PP karışımı melez iplik, PP astar üzerine sarılmış ve takviye tabakası üzerine PP film kaplanmıştır. Sarma işleminde helisel, çevresel ve bunların kombinasyonu yöntemler denenmiştir. Borulara çekme, eğme ve darbe testleri uygulanarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Borular iç astar, takviye katmanı ve dış astar olmak üzere üç katmandan olacak şekilde tasarlanmıştır. İç astar olarak 160 mm PP atık su borusu (Dizayn Teknik Boru ve Elemanları San. ve Tic A.Ş.) kullanılmıştır. Takviye olarak %ağ. 60 E-cam ve PP elyaf karışımından oluşan melez iplik (Twintex RPP60N265) kullanılmıştır. Kullanılan melez ipliğin ağırlığı 1872 Tex'tir (265 yarda/libre). Ortalama kalınlık değeri 5,46±2,2 mm ve genişliği ortalama 0,44±0,09 mm'dir.

Elyaf sarma prosesinde nozul sıcaklığı 220°C, sıkıştırma silindiri basıncı 1 bar ve mandrel dönüş hızı 6 mm/dakika olarak ayarlanmıştır. Melez iplikler iki farklı teknikle sarılmıştır. Bunlar Şekil 1'de görülmektedir. Helisel sarımda 45°, çevresel sarımda ise ~90°'lik sarım açıları kullanılmıştır. Ayrıca bunların birlikte kullanıldığı bir üretim de yapılmıştır.



Şekil 1. Uygulanan sarım teknikleri.

Dış astar ise PP'den (Sabic Vestolen P) cast film makinesinde (Gülnar Plastik Makinaları San ve Tic. Ltd. Şti.) 0,70±0,05 mm kalınlığında film şeklinde üretilmiştir. Bu filmler takviye katmanı üzerine helisel olarak sarılarak elyafların üzeri kaplanmıştır. İç astar, takviye katmanı ve

dış astardan oluşan PP kompozit borulardan ilgili standartlarda numeneler çevresel ve eksenel yönlerde numuneler çıkartılmıştır. Ayrıca üretilen kompozit boruların performanslarını karşılaştırmak için iç astar olarak kullanılan takviyesiz PP borudan da numuneler alınmıştır (PP kodlu).

EN ISO 527-4'e göre kemik şekilli alınan numuneler 5 mm/dakika hızda çekme testine maruz bırakılmıştır. Çekme gerilme-gerinim eğrileri üzerinden çekme dayanımı [MPa] ve kopma uzaması [%] doğrudan okunmuş, elastisite modülü [GPa] %0,2 uzama sınırından ve tokluk [MPa/(mm/mm)] ise eğri altında kalan alan üzerinden hesaplanmıştır. EN ISO 14125'e göre 10 mm/dakika hızda eğme testi yapılmış ve eğme modülü [GPa] ve dayanımı [MPa] bulunmuştur. Çekme ve eğme testlerinde Instron 3369 Universal test cihazı kullanılmıştır. EN ISO 179'a göre çentikli darbe testi 6 J'luk çekice sahip Devotrans Charpy darbe cihazında yapılmış ve darbe dayanımları [kJ/m^2] hesaplanmıştır. Mekanik testlerde her grup için en az beş numune test edilmiş ve standart sapmaları hesaplanmıştır.

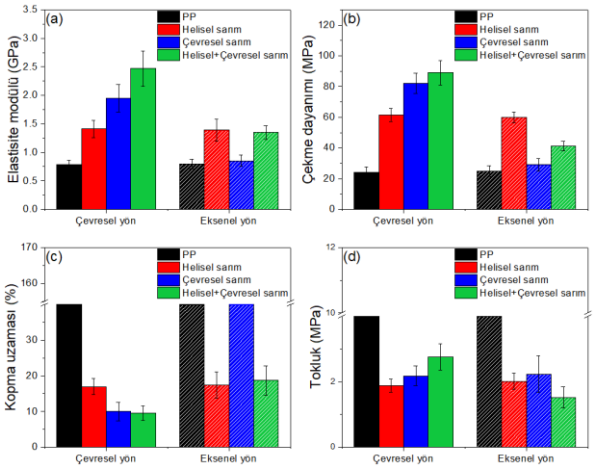
Çekme testi sonrası kırık yüzey analizleri taramalı elektron mikroskobunda (SEM) görüntüleri alınarak yapıldı. Phenom G3 Pro marka cihazda geri-saçılan elektron dedektörü ile 5 kV ivmelendirme voltajında görüntüler çekildi. Görüntü alınmadan önce Quorum Q150R S marka cihazda altın kaplama işlemi yapıldı.

3. Bulgular ve Tartışma

Elyaf sarma, silindirik geometrili termoset matrisli kompozit parçaların yüksek verimlilikte üretiminde kullanılan geleneksel bir yöntemdir. Bu çalışmada elyaf sarma yöntemi termoplasitk matrisli boruların üretime olanak sağlayacak şekilde ısıtıcı ilavesiyle modifiye edilmiştir. Ayrıca daha iyi konsolidasyon sağlanması için melez iplik kullanılmıştır. Çeşitli sarma teknikleri ile üretilen borulardaki çevresel ve eksenel yönlerdeki mekanik özellikler değerlendirilmiştir.

Borularda oluşan eksenel ve çevresel yönlerdeki yükler arasındaki etkileşim karmaşıktır ve yapısal bütünlüğün sağlanması için kapsamlı test ve modelleme gerektirir. Borulara gelen eksenel yöndeki çekme ve basma yükleri boruların taşımı, yerleştirilmesi ve montajı esnasında önemlidir (Malta vd., 2014; Kristoffersen vd., 2017). Çevresel yöndeki özellikler ise özellikle iç basınca maruz sistemlerde önemlidir. Çember gerilimi olarak da bilinen çevresel basınç, boruların yapısal bütünlüğü ve performansında kritik bir faktördür. Bu basınç, boru duvarlarına etki eden iç akışkan basıncı tarafından üretilir ve boru hattı sistemlerinin tasarımı ve analizinde önemli bir husustur. Çember gerilimi, iç basınç, boru çapı ve duvar kalınlığına göre hesaplanır. Borunun hasar oluşmadan iç basınçlara dayanma yeteneğini belirlemek için önemlidir (Zhu vd., 2005; Menon, 2011). Çekme dayanımı bu hesaplamalarda kullanılan başlıca veri olduğundan öncelikle çekme sonuçları incelenmiştir.

Şekil 2'de çekme testi sonucunda elde edilen veriler yer almaktadır. Buna göre elastisite modülü ve çekme dayanımı değerleri çevresel yönde çevresel sarımda helisele göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. Çekme dayanımı takviyesiz PP'de 24±3,74 MPa iken helisel sarım ile 61,5±4,25 MPa, çevresel sarım ile 82±6,55 MPa olmuştur. Helisel+çevresel sarım kombinasyonunda ise 89±8,01 MPa ile en yüksek sonuçlar alınmıştır. Kopma uzamasında ise bu sonuçların tam tersi elde edilmiştir ve helisel sarımda %17±2,3, çevresel sarımda %10±2,55 ve helisel+çevresel sarım kombinasyonunda %9,5±1,99 değerleri alınmıştır. Fiberler kopma uzamasını engellediği için tokluk değerleri takviyesiz PP kadar yüksek elde edilememiştir, ancak helisel+çevresel sarımda tokluk 2,76±0,41 MPa'ya kadar artmıştır.



Şekil 2. Çekme testi sonuçları: a) elastisite modülü, b) çekme dayanımı, c) kopma uzaması, d) tokluk.

Eksenel yönde ise helisel sarım ve helisel+çevresel sarımda belirgin derece yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Çekme dayanımı helisel sarımda 60±3,6 MPa, helisel+çevresel sarımda 41,2±3,13 MPa olmuştur. Ancak kopma uzaması ve tokluk değerlerinde bu sonuçların tam tersi alınmıştır. Hem çevresel hem de eksenel yönde kopma uzaması ve tokluk değerleri takviyesiz numunelerde en yüksek sonuçları vermiş ve sarımlar sonuncunda değerler ciddi oranda azalmıştır. İyi arayüzeye sahip kompozitlerde bu sonuçlar beklenmektedir. Takviye malzemesi fiberler uzama değeri oldukça düşük bir malzeme olduğundan kompozitin uzamasına da izin vermeyecektir.

Tablo 1'de eğme testi sonuçları gözükmektedir. Çekme testinde olduğu gibi takviyesiz numuneler en düşük sonuçları vermiştir ve sarım sonucu elastisite modülü (E_f) ve eğme dayanımı değerleri (σ_f) artmıştır. Çevresel yönde sırasıyla helisel, çevresel ve helisel+çevresel kombinasyonunda artan değerler elde edilmiştir. Heliselde 42,25±2,97 MPa, çevreselde 49,19±4,43 MPa ve helisel+çevresel kombinasyonunda 51,15±6,21 MPa eğme dayanımı elde edilmiştir. Eksenel yönde ise 2,13±0,22 GPa modül ve 43,84±3,03 MPa dayanım ile helisel sarım sonucu en yüksek değerleri göstermiştir.

Tablo 2'de verilen darbe testi sonuçlarına göre sarım sonrası darbe dayancı ciddi oranda artmıştır. Çevresel ve eksenel yönlerde de helisel+çevresel sarım sonucu,

sırasıyla 103,48±11,55 kJ/m² ve 81,65±9,11 kJ/m², ile en yüksek değerlere ulaşılmıştır.

Benzer bir çalışma Baali vd. tarafından geleneksel elyaf sarma yöntemiyle farklı sarma açıları ve katman kalınlığında E-camı/polyester borularda yapılmış (%55 fiber hacim oranında) ve çevresel yönde çekme dayanımı 70°'lik sarımda 460-503 MPa arasında iken, 45°'lik sarımda 201,4 MPa bulunmuştur. Aynı çalışmada eksenel yönde ise 70°'lik sarımda dayanım 25 MPa iken 45°'lik sarımda 57,50 MPa'dır (Baali vd., 2020).

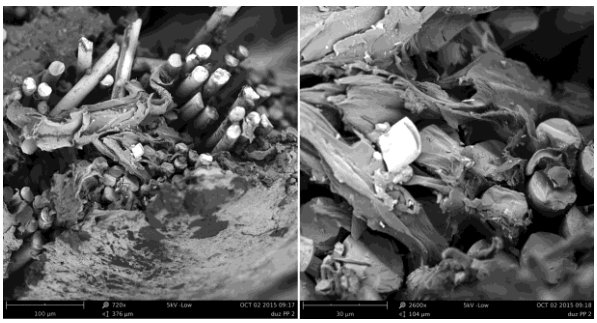
Tablo 1. Eğme testi sonuçları

	Çevresel yön			Eksenel yön	
	E_f [GPa]	σ_f [MPa]		E_f [GPa]	σ_f [MPa]
PP	1,72±0,17	30,17±2,25	PP	1,74±0,19	32,25±2,10
Helisel sarım	2,08±0,25	42,25±2,97	Helisel sarım	2,13±0,22	43,84±3,03
Çevresel sarım	2,57±0,32	49,19±4,43	Çevresel sarım	1,82±0,21	32,36±3,13
Helisel+Çevresel	2,83±0,39	51,15±6,21	Helisel+Çevresel	1,96±0,20	43,51±5,45

Tablo 2. Darbe testi sonuçları

	Çevresel yön		Eksenel yön
	α_{cN} [kJ/m²]		α_{cN} [kJ/m²]
PP	25,25±3,05	PP	26,72±4,13
Helisel sarım	62,75±6,84	Helisel sarım	66,36±7,75
Çevresel sarım	86,42±7,20	Çevresel sarım	45,98±6,42
Helisel+Çevresel	103,48±11,55	Helisel+Çevresel	81,65±9,11

Çevresel yönden daha yüksek dayanım değerlerini ulaşılmasının nedeni anlamak için çekme testi sonrası kırık kesitler SEM'de incelenmiş ve görüntüler Şekil 3'te verilmiştir. Çevresel yönde dayanımındaki bu azalmanın başlıca nedenlerinden biri, fiberler ile PP matris arasındaki zayıf yapışma olduğu görülmüştür. Görüntülerde fiber sıyrılması türü hasar oluştuğu görülmüştür. Bu hasar türü zayıf fiber-matris arayüzey oluşumlarında görülen bir türdür. Ancak matris içinde kopmuş fiberler de görülmektedir. Üstelik sıyrılmış fiberlerin yüzeylerinde polimer kalıntıları olduğu görülmüştür. Ayrıca çoğu bölge fiberler matris ile çevrelenmiştir. Bu bölgelerde fiber-matris arayüzey bağlantısının güçlü bir şekilde oluştuğu yorumlanabilir. Bu durumda arayüzey oluşumunda homojenlik yakalanamamış olduğu sonucuna varılabilir. Bunun geliştirilmesi için proses parametrelerinden sıkıştırma silindiri basıncı ve mandrel dönüş hızı üzerinde çalışmalar devam ettirilebilir.



Şekil 3. Helisel+çevresel sarım yapılmış numunenin kırık kesit SEM görüntüleri (720X ve 2600X).

4. Sonuç

Bu çalışmada cam elyaf/PP melez iplikler kullanılarak elyaf sarma yöntemiyle PP kompozit borular üretilmiştir. Helisel, çevresel ve bunların kombinasyonu sarma teknikleri kullanılarak üretilen borular çevresel ve eksenel yönlerde mekanik olarak test edilmiştir. Takviyesiz boru ile kıyaslandığında, uygulanan bütün sarım teknikleri ile modül ve dayanım değerlerde artış gözlenmiştir. Helisel sarımda hem çevresel hem de eksenel yönde benzer sonuçlar alınmışken, çevresel sarımda çevresel yönde çok daha yüksek sonuçlar alınmıştır. Genel olarak en yüksek sonuçlar helisel+çevresel sarımın kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu davranışın temel sebebi çevresel sarımda çevresel yönde dayanım değerlerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Helisel sarım 45°'lik bir takviyelendirme sağladığı için her iki yönde de benzer özellikler sergilemiştir. Kopma uzaması ve tokluk takviyesiz PP'de çok yüksektir ve sarım işlemleri ile bu değerler azalmıştır. SEM incelemelerinde fiber sıyrılmaları gözlenmiştir. Öte yandan fiber yüzeylerinde polimer kalıntıları ve fiberlerin arasına polimerin geçtiği görülmüştür. Buradan fiber-matris arayüzeyinin bazı yerlerde zayıf bazı yerlerde iyi seviyede oluşmuştur. Bu nedenle çalışmanın devamı proses parametreleri optimizasyonu ile sürdürülebilir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	A.A.	M.D.	A.Ü.
K	40	30	30
T	40	30	30
Y	40	30	30
VTI	40	30	30
VAY	40	30	30
KT	40	30	30
YZ	40	30	30
KI	40	30	30
GR	40	30	30
PY	40	30	30
FA	40	30	30

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi 2014-07-02-GEP-02 kodlu proje kapsamında ve Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı San-Tez Programı 01549.STZ.2012-2 kodlu proje kapsamında desteklenmiş.

Kaynaklar

Akhmetov RR, Krainov SA, Nazarova MN, Tsenev AN, 2018. Research of main gas pipeline (steels X65, X60, 17G1S) susceptibility to stress corrosion cracking, hydrogen uptake and ST 37-2 steel fatigue testing. Earth Environ Sci, 194: 042018.

Alabtah FG, Mahdi E, Eliyan FF, 2021. The use of fiber reinforced polymeric composites in pipelines: A review. Compos Struct, 276: 114595.

Alsabri A, Al-Ghamdi SG, 2020. Carbon footprint and embodied energy of PVC, PE, and PP piping: Perspective on environmental performance. Energy Rep, 6: 364–370.

Baali B, Benmounah A, Rokbi M, 2020. Mechanical characterization and optimum design of wound glass-fiber-reinforced polymer pipes based on the winding angle and the number of plies. Mech Compos Mater, 56: 673–684.

Bai Y, Yu B, Cheng P, Wang N, Ruan W, Tang J, Babapour A, 2015. Bending behavior of reinforced thermoplastic pipe. J Offshore Mech Arct Eng, 137(2): 021701.

Balkan O, Demirer H, Ezdeşir A, Yıldırım H, 2008. Effects of welding procedures on mechanical and morphological properties of hot gas butt welded PE, PP, and PVC sheets. Polym Eng Sci, 48(4): 732–746.

Barber P, Atkinson JR, 1974. The use of tensile tests to determine the optimum conditions for butt fusion welding certain grades of polyethylene, polybutene-1 and polypropylene pipes. J Mater Sci, 9(9): 1456–1466.

Boon YD, Joshi SC, Bhudolia SK, 2021. Filament winding and automated fiber placement with in situ consolidation for fiber reinforced thermoplastic polymer composites. Polymers, 13(12): 1951.

Boragno L, Braun H, Hartl AM, Lang RW, 2017. Polypropylene for pressure pipes—from polymer design to long-term performance. In: Grellmann W, Langer B, editors. Deformation and Fracture Behaviour of Polymer Materials. Springer, New York, USA, pp: 189–201.

Bush SF, 1999. Long glass fibre reinforcement of thermo plastics. Int Polym Process, 14(3): 282–290.

Cao Y, Yu X, Liu Z, Bai Y, Gong X, 2017. On critical design parameters of reinforced thermoplastic pipes associated with the pipe-lay installation. Ships Offshore Struct, 12(sup1): 134–143.

Connell M, Stenson A, Weinrich L, LeChevallier M, Boyd SL, Ghosal RR, Dey R, Whelton AJ, 2016. PEX and PP water pipes: Assimilable carbon, chemicals, and odors. J AWWA, 108(4): 192-204.

Delli E, Giliopoulos D, Bikiaris DN, Chrissafis K, 2021. Fibre length and loading impact on the properties of glass fibre reinforced polypropylene random composites. Compos Struct, 263: 113678.

Deng C, Jin B, Zhao Z, Shen K, Zhang J, 2019. The influence of hoop shear field on the structure and performances of glass fiber reinforced three-layer polypropylene random copolymer pipe. J Appl Polym Sci, 136(3): 46985.

Domaneschi M, 2012. Experimental and numerical study of standard impact tests on polypropylene pipes with brittle behaviour. Proc Inst Mech Eng B, 226(12): 2035–2046.

Ford RA, 2004. Semi-finished thermoplastic composites-realising their potential. Mater Des, 25(7): 631–636.

Friedrich K, 1999. Commingled yarns and their use for composites. In: Karger-Kocsis J, editor. Polypropylene: An A-Z Reference. Springer, Dordrecht, Netherlands, pp: 148.

Gahleitner M, Tranninger C, Doshev P, 2019. Polypropylene Copolymers. In: Karger-Kocsis J, Bárány T, editors. Polypropylene handbook. Springer, Cham, London, UK, pp: 585–602.

Gebrehiwot SZ, Espinosa-Leal L, 2022. Characterising the linear viscoelastic behaviour of an injection moulding grade polypropylene polymer. Mech Time-Depend Mater, 26(4): 791–814.

Gibson AG, 2003. The cost effective use of fibre reinforced composites offshore. HSE, Bootle, London, UK, pp: 123.

Goodship V, 2016. Injection Molding of Thermoplastics. In: Goodship V, Middleton B, Cherrington R, editors. design and manufacture of plastic components for multifunctionality. William Andrew Publishing, New York, USA, pp: 103–170.

Hametner Ch, 1999. Polypropylene pipes for drinking water supply. J Macromol Sci A, 36(11): 1751–1758.

Hastie JC, Guz IA, Kashtalyan M, 2022. Numerical modelling of spoolable thermoplastic composite pipe (TCP) under combined bending and thermal load. Ships Offshore Struct, 17(9): 1975–1986.

Huang Y, Gentle CR, Lacey M, Prentice P, 2000. Analysis and improvement of die design for the processing of extruded plastic pipes. Mater Des, 21(5): 465–475.

Karbuz P, Dogu M, Ozbek B, 2024. Manufacturing of hexagonal cross-section thermoplastic matrix composite parts with

automatic filament winding system. J Manuf Proc, 129: 62–76.

Kristoffersen M, Børvik T, Langseth M, Ilstad H, Levold E, 2017. Transverse deformation of pressurised pipes with different axial loads. J Offshore Mech Arct Eng, 3B: 1-10.

Litvinov VM, Soliman M, 2005. The effect of storage of poly(propylene) pipes under hydrostatic pressure and elevated temperatures on the morphology, molecular mobility and failure behaviour. Polymer, 46(9): 3077–3089.

Lou M, Wang Y, Tong B, Wang S, 2020. Effect of temperature on tensile properties of reinforced thermoplastic pipes. Compos Struct, 241: 112119.

Lynam C, Milani AS, Trudel-Boucher D, Borazghi H, 2014. Predicting dimensional distortions in roll forming of comingled polypropylene/glass fiber thermoplastic composites: On the effect of matrix viscoelasticity. J Compos Mater, 48(28): 3539–3552.

Malta ER, De Arruda Martins CA, 2014. Finite element analysis of flexible pipes under compression. J Offshore Mech Arct Eng, 6A.

Mattausch H, 2015. Development of halogen-free flame retardant polypropylene compounds for pipe application. PhD thesis, University of Leoben, Leoben, Austria, pp: 182.

Menon ES, 2011. Pipe strength and wall thickness. Pipeline Planning and Construction Field Manual. Gulf Prof Publ, 2011: 105–121.

Moussa HK, Challita G, Yared W, Rizk MA, 2022. Predictive analysis of the influence of a polypropylene-talc composite layer on the ring stiffness of a multilayer plastic pipe. Mech Compos Mater, 57(6): 749–758.

Ohaeri E, Eduok U, Szpunar J, 2018. Hydrogen related degradation in pipeline steel: A review. Int J Hydrogen Energy, 43(31): 14584–14617.

Özbay B, Bekem A, Ünal A, 2020. Manufacturing of hybrid yarn thermoplastic composites by the method of filament winding. Gazi Univ J Sci, 33(1): 214–227.

Pontes AJ, Pouzada AS, 2004. Ejection force in tubular injection moldings. Part I: Effect of processing conditions. J Polym Eng, 44(5): 891–897.

Poungthong P, Kolitawong C, Saengow C, Giacomin AJ, 2018. Plastic pipe solidification in extrusion. J Polym Eng, 38(6): 591–603.

Rachmawati P, Ma'arif S, 2022. Comparison of corrosion rate on mild steel welded joints using acid and alkaline solutions. AIP Conf Proc, 2499(1): 040004.

Rafiee R, Mazhari B, 2016. Evaluating long-term performance of Glass Fiber Reinforced Plastic pipes subjected to internal pressure. Constr Build Mater, 122: 694–701.

Selver E, Potluri P, 2017. Glass/Polypropylene Commingled Yarns for Damage Tolerant Thermoplastic Composites. Eur Mech Sci, 1(3): 93–103.

Singer R, Ollick AM, Elhadary M, 2021. Effect of cross-head speed and temperature on the mechanical properties of polypropylene and glass fiber reinforced polypropylene pipes. Alex Eng J, 60(6): 4947–4960.

Vaneker THJ, 2017. Material extrusion of continuous fiber reinforced plastics using commingled yarn. Procedia CIRP, 66: 317–322.

Walsh T, 2011. The plastic piping industry in north america. In: Kutz M, editor. Applied Plastics Engineering Handbook. William Andrew Publishing, New York, USA, pp: 585–602.

Wasim M, Shoaib S, Mubarak NM, Inamuddin, Asiri AM, 2018. Factors influencing corrosion of metal pipes in soils. Environ Chem Lett, 16: 861–879.

Yu K, Morozov EV, Ashraf MA, Shankar K, 2015a. Analysis of flexural behaviour of reinforced thermoplastic pipes considering material nonlinearity. Compos Struct, 119: 385–393.

Yu K, Morozov EV, Ashraf MA, Shankar K, 2015b. Numerical analysis of the mechanical behaviour of reinforced thermoplastic pipes under combined external pressure and bending. Compos Struct, 131: 453–461.

Yu K, Morozov EV, Ashraf MA, Shankar K, 2017. A review of the design and analysis of reinforced thermoplastic pipes for offshore applications. J Reinf Plast Compos, 36(20): 1514–1530.

Yu L, Wu T, Chen T, Yang F, Xiang M, 2014. Polypropylene random copolymer in pipe application: Performance improvement with controlled molecular weight distribution. Thermochim Acta, 578: 43–52.

Zhu XK, Leis BN, 2005. Analytic prediction of plastic collapse failure pressure of line pipes. ASME Conf Proc, 3: 109–118.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering. 1641356

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)
Cilt 8 - Sayı 3: 799-813 / Mayıs 2025
(Volume 8 - Issue 3: 799-813 / May 2025)

SİVİL HAVACILIK SEKTÖRÜNDE EMİSYON HESAPLAMA YÖNTEM VE YÖNETİMİ: TRABZON, RİZE-ARTVİN VE ORDU-GİRESUN HAVALİMANLARI ÖRNEĞİ

Fatih KARAMAN[1]*

[1]*İstanbul Medipol University, Faculty of Business and Management Science, Department of Aviation Management, İstanbul, Türkiye*

Özet: Günümüzde hava araçları tarafından oluşturulan emisyon gazları, yönetimlerin en çok mücadele ettikleri alanlardan birisi haline gelmiştir. Diğer taraftan işletmelerin de mal veya hizmet üretimleri esnasında mecburi olarak ekonomik değeri olmayan atıkları çıkarmaları normaldir ve bu sebeple çevre ile etkileşimleri mecburidir. Emisyon yönetimi aslında maliyet yaratan bir uygulamadır ve düzgün olarak ya da hiç yapılmadığı zamanlarda organizasyonların bulundukları çevrelerde zararlara yol açabilmektedir. Taşımacılık sektöründe en modern, hızlı ve kaliteli taşıtların kullanıldığı havacılık sektörü, kullanımının artması sebebiyle emisyon yönetimi uygulamalarının kullanımını zorunlu kılmaktadır. Belirlenen hesaplama yöntemleri ile bulunulan seviyenin sürekli tespit edilip kontrol edilmesi, zararların sürekli en aza indirilmesi, atıkların azaltılması, çevreye duyarlı teknoloji kullanımı, yeni sistem uçak motorlarının ve yakıtların geliştirilmesi gibi konular emisyon yönetiminde en etkili geliştirme yöntemleri arasında gösterilmektedir. Çalışmanın amacı kullanımı sürekli artış gösteren havacılık sektöründeki emisyon yönetimi uygulamalarının örneklenmesi adına belirlenen havalimanlarında oluşan emisyonların hesaplanmasıdır. Bu sayede iklim değişikliğinde meydana gelen olumsuzlukların daha iyi anlaşılmasının sağlanması, değişikliğe neden olan zararların azaltılmasına bir örnek gösterilmesi ve ileriye yönelik yapılacak çalışmalara da fikir verilmesi amaçlanmıştır. Çalışma neticesinde hava araçlarının neden olduğu emisyon değerleri içinde en başta gelen negatif etkinin karbondioksit kaynaklı olduğu anlaşılmaktadır. Farklı tiplerdeki uçakların LTO sayılarının emisyon değerlerine direkt etkide bulunduğu, yeni nesil hava araçlarının kullanılmasının olumlu sonuçlar doğuracağı ve sadece hava araçları değil havalimanlarının da yeşil sertifikalı seviyelere çıkarılması gerektiği önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Havacılık sektörü, Emisyon yönetimi, Havalimanları

Emission Calculation Methods and Management in the Civil Aviation Sector: Trabzon, Rize-Artvin and Ordu-Giresun Airports Example

Abstract: Today, emission gases generated by aircraft have become one of the areas that managements struggle the most. On the other hand, it is normal for businesses to produce waste that has no economic value during the production of goods or services, and therefore their interaction with the environment is mandatory. Emission management is actually a cost-creating application and can cause damage to the environments where organizations are located when it is not done properly or at all. The aviation sector, where the most modern, fast and high-quality vehicles are used in the transportation sector, necessitates the use of emission management applications due to the increase in their use. Continuous determination and control of the current level with the specified calculation methods, continuous minimization of damages, reduction of waste, use of environmentally friendly technology, development of new system aircraft engines and fuels are shown among the most effective development methods in emission management. The aim of the study is to calculate the emissions generated at the determined airports in order to exemplify the emission management applications in the aviation sector, the use of which is constantly increasing. In this way, it is aimed to provide a better understanding of the negativities occurring in climate change, to show an example for reducing the damages causing change and to give ideas for future studies. As a result of the study, it is understood that the most negative effect among the emission values caused by aircraft is carbon dioxide. It is suggested that the LTO numbers of different types of aircraft have a direct effect on emission values, that the use of new generation aircraft will have positive results, and that not only aircraft but also airports should be raised to green certified levels.

Keywords: Aviation industry, Emission management, Airports

***Corresponding author**: İstanbul Medipol University, Faculty of Business and Management Science, Department of Aviation Management, İstanbul, Türkiye
E mail: fatih.karaman@medipol.edu.tr (F. KARAMAN)
Fatih KARAMAN https://orcid.org/0000-0001-5915-8054

Gönderi: 17 Şubat 2025 **Received:** February 17, 2025
Kabul: 04 Nisan 2025 **Accepted:** April 04, 2025
Yayınlanma: 15 Mayıs 2025 **Published:** May 15, 2025

Cite as: Karaman F. 2025. Emission calculation methods and management in the civil aviation sector: Trabzon, Rize-Artvin and Ordu-Giresun Airports example. BSJ Eng Sci, 8(3): 799-813.

1. Giriş

Günümüz sosyal ve ticari taşımacılık alanında faaliyet gösteren sivil havacılık sektörü, Yavaş ve Dedeoğlu'na (2021) göre farklı ticari faaliyetleri, insanları, yükleri ve kültürleri birbirine bağlayan küresel bir endüstri bölümü haline gelmiştir. Artık insanlar yaşam alanlarını, market, pazar, okul, toplu taşıma gibi toplumsal gerekliliği olan yerlere yakın olmasına dikkat etmelerinin yanında havalimanları gibi büyük yerleşimlere yakın olmalarına dikkat etmektedirler. Günümüzde dünya nüfusunun

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

yaklaşık % 51'lik kısmının herhangi bir havalimanına yakın yaşadığı ve yaklaşık % 74'lük kısmının ise herhangi bir havalimanına yakınlık mesafesi 100 km'nin altında bulunduğu ICAO (2021) raporlarında belirtilmektedir. Dolayısıyla sivil havacılık sektörünün hızlı bir biçimde büyüme gösterdiği artık bilinen bir gerçek olmaktan öte, kurumların ve işletmelerin farklı yaşayış tarzlarına geçmelerine ve gerekliliklerin değişimine yol açmaktadır. Özellikle küreselleşmenin insan hayatı için zararlarının başında belirtilen çevre kirliliğinin oluşumunda, havacılık sektörünün meydana getirdiği ses ve nispeten daha fazla olan motor emisyonları olarak neticelerini ortaya çıkarmaktadır. Zira diğer taşımacılık sektörleri gibi havacılık sektörünün de bir takım çevresel olumsuz etkilerinin olduğu aşikârdır. Teknoloji, hız ve kalite denilince akla ilk gelen taşımacılık alanı olan sivil havacılık sektörünün özellikle uçak motorlarından kaynaklı emisyonlarının hava kirliliğine, dolayısıyla çevreye verilen zarar neticesinde iklim değişikliğine olan etkileri Linz'e (2012) göre diğer taşımacılık çeşitlerine oranla az da olsa hatırı sayılır derecede olduğu belirtilmektedir.

Uçak motorlarından kaynaklı emisyon değerleri incelendiğinde motor içinde oluşan yanma neticesinde CO, CO2, SO2 ve NOx olarak adlandırılan emisyon gazları ile partiküllerin oluştuğu bilinmektedir. Özellikle yanma ürünleri içinde gösterilen CO emisyonu düşük sıcaklıktaki yanma neticesinde meydana gelmektedir. Spicer vd.'ne (2009) göre havacılık sektöründe çevre kirliliği ve emisyon azaltımının önlenmesi için öncelikle bu CO misyonuna sebep olan yanma işleminin kusursuz biçimde yapılmasını sağlamak gerekmektedir. Aslında sivil havacılık sektöründe kullanılan uçak motorlarından kaynaklı egzoz emisyon oranlarının insan kaynaklı yüzey emisyonlarına oranla daha az çevre kirliliğine neden olduğu birçok çalışmada belirtilmektedir (Schumann, 2000). Buna bir sebep de dünyada üretilen tüm petrol ürünlerinin yaklaşık olarak % 6'sının havacılık sektöründe yakıt olarak kullanılması gösterilebilir. Dolayısıyla insan kaynaklı bütün NOx emisyonlarında da sivil havacılık sektörünün etkileri Berntsen vd.'ne (2003) göre % 3 civarında olmaktadır. Bu sebeple hava araçlarının ortaya çıkardığı emisyonların atmosfer üstündeki konumları ve ileride hava trafiğindeki artış tahminleri, ilgili emisyon değerlerine ve kontrolüne önem verilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Dünya'da ve Türkiye'de yapılan çeşitli araştırmalar ile hem havaalanları hem de hava araçlarından kaynaklanan emisyon değerleri analiz edilegelmektedir. Frankfurt, Viyana ve Londra havaalanlarındaki hava araçlarının emisyonlarının incelendiği araştırmada Schafer vd. (2003), NOx emisyon değerlerinin ICAO datalarına oranla % 50 daha fazla olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bir diğer araştırma Zürih Havalimanında Fleuti ve Polymeris (2004) tarafından yapılmış ve uçakların LTO döngüleri incelenerek ICAO LTO döngüsünden farklılıklara rastlanılmıştır. Heathrow Havalimanı'nda yapılan araştırmada Carslaw vd. (2008), NOX emisyonlarının çevreyi kirleten etkenler arasındaki oranını belirleyerek neticelerinin uzak alanlara da gidebildiğini belirtmiştir. 2011 yılında Dallas/Fort Worth Havalimanı'nda yapılan bir diğer çalışmada Nikoleris vd. (2011) uçaklara ait yakıt tüketimlerini ve bunun sonucunda oluşan emisyon değerlerini hesaplamışlardır.

Türkiye'deki çalışmalara örnek olarak LTO döngüsü esnasında ortaya çıkan negatif emisyonların hesaplanmasında Kesgin (2006), İstanbul Atatürk Havalimanı için emisyon miktarlarını hesaplamıştır. Bir diğer havalimanı olan İzmir Adnan Menderes Havalimanı'nda Elbir'in (2008) yaptığı araştırmada uçakların meydana getirdiği emisyon değerleri hesaplanmıştır. Kayseri Erkilet Havalimanı'nda Öztürk'ün (2011) yaptığı çalışmada yine emisyon değerleri hesaplanmıştır. Günümüzde artık en fazla kullanımı olan gaz türbinli motorların oluşturduğu kirletici emisyonların incelenmesi çalışmaları ile İlbaş ve Yılmaz (2012) aslında kirleticilerin ana etkenlerini araştırma anlamında farklı bir bakış açısı ortaya koymuşlardır. Nevşehir Kapadokya Havalimanı'ndaki hem gürültü hem de emisyon ölçümlerinin yapıldığı çalışmalarıyla Ünal vd. (2014) ile Dalaman Havalimanı'nda Kumaş vd. (2019), LTO döngüsünde karbon ayak izinin hesaplanması konusundaki çalışmalar da yine diğer örnekler olarak verilebilir. Isparta Süleyman Demirel Havalimanı'ndaki emisyonların hesaplanması ve çevresel etkileri çalışmaları ile Ekici ve Şöhret (2020), Malatya Erhaç Havalimanı emisyonlarının hesaplandığı çalışmalarında Genç ve Behçet (2022) ve Ankara Esenboğa Havalimanı'ndaki LTO döngüsünün oluşturduğu emisyonların çevreye etkilerinin incelendiği çalışmalarıyla Öz ve Ercoşkun (2022), emisyon hesaplamaları ile ilgili ülkemizde yapılan örneklemeler açısından önem arz etmektedir.

Günümüze kullanımı sürekli artış gösteren hava araçlarının meydana getirdiği emisyon değerlerinin ölçülmesi ile ilgili farklı çalışmalar da bulunmaktadır. Hava aracı emisyon değerlerine yönelik ilk çalışmalar öncelikle gaz ile ilgili olsa da 80 ve 90'lı yıllarda egzoz gazlarının kimyasal bileşimlerinin detaylı incelenmesi yanında sonraları daha sık kullanılan türbin motorlarının oluşturduğu parçacıkların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin incelendiği çalışmalar daha fazla yapılmaya başlanmıştır (Spicer vd., 1987). Hatta Amerikan hükümetinin havalimanlarından kaynaklanan emisyonların hesaplanmasına yönelik yapmış olduğu bir çalışma, bu konuda ilk girişim olarak gösterilebilir. İlgili çalışma sonrasında oluşturulan Environmental Protection Agency (EPA) raporunda 1970 ile 1995 yılları arasındaki uçak emisyon değerleri incelenerek bir trend belirlenmiş ve sonraki yıllara yönelik tahminler yapılmıştır (EPA, 1999). Tribhuvan Havalimanı'nda LTO döngüsüne istinaden emisyonların hesaplandığı çalışmalarında Bajgai ve Shrestha (2023), Katmandu vadisindeki hava kalitesi üzerinde meydana gelen emisyonların etkilerini incelemişlerdir. Araştırma neticesinde LTO'nun etkili olduğu emisyonların yıl içinde belli oranlarda değiştiği ortaya konularak en yüksek etkinin muson öncesi

mevsimlerde yaşandığı belirtilmiştir. Havalimanı trafiğinde önemli bir yere sahip olan uçakların taksi yapmaları esnasında uygulanan yolların karşılaştırıldığı çalışmalarında Cao vd. (2023), bu konudaki farklı taksi yöntemlerinin emisyon değerlerini hesaplayarak çevre verdikleri emisyon değerlerini incelemişlerdir. Çin'de bulunan Xining Havalimanı'ndan alınan veriler ile tek motorla yapılan taksi, tam motor vasıtası ile yapılan taksi, yerleşik sistemler, yüzeydeki trafik ve sevk çekme yöntemlerinin bulunduğu beş farklı taksi yönteminin yakıt tüketimleri ve oluşturduğu emisyon değerlerinin karşılaştırmaları yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında ise yeni yöntemlerin eskiden kullanılan geleneksel yöntemlere oranla daha çevreye duyarlı ve dost neticeler çıkardığı ortaya konularak ileriki yıllara yönelik tahminler de belirtilmiştir.

2. Literatür Değerlendirmesi

Karbonmonoksit (CO), emisyon değerlerinde temel alınan, havacılık sektöründe yanmanın düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi neticesinde oluşan ve canlılar açısından çok tehlikeli zehirli bir gaz çeşididir. Emisyon hesaplamalarında kullanılan diğer zehirli gaz türü NO_x ise yanma esnasında yüksek sıcaklık ile tepkimeye giren oksijen molekülleri (O_2) ile nitrojen atomundan (N) oluşan nitrik oksit (NO) gazı ile nitrojen dioksit (NO_2) gazına verilen addır (Spicer, 2009). Havacılık sektöründe kullanılan uçak yakıtları, genel isim olarak jet yakıtı olarak adlandırılan aslında gaz yağı ana etken maddesine sahip sıvıya denilmektedir. Bu yakıt türü turbofan veya türbin motorlu uçaklarda kullanılmakla birlikte daha küçük veya piston motorların kullanıldığı hava araçlarında ise havacılık benzini olarak adlandırılan diğer bir yakıt türü kullanılmaktadır. Çalışma konusu olan emisyon değerlerinin hesaplanmasında baz alınan uçak motor tipleri ise turbofan veya türbin motorlu uçakların oluşturduğu emisyon değerleri olduğundan ilgili motor tipli uçakların oluşturduğu emisyon çeşitleri olarak CO_2, NO_x, H_2O buharı, CH_4, CO, SO_x, metan gazı harici organiklerden uçucu olan bileşikler ve partikül maddeleri (PM) olarak sıralanabilmektedir. Aşağıda çoğu hava araçlarının motorlarında yaşanan hava ile akaryakıt akışı ile yanma periyodu ve Wuebbles vd.'ne (2007) göre oluşan kimyasal süreç neticesinde oluşan emisyon gazları ile partiküller belirtilmektedir:

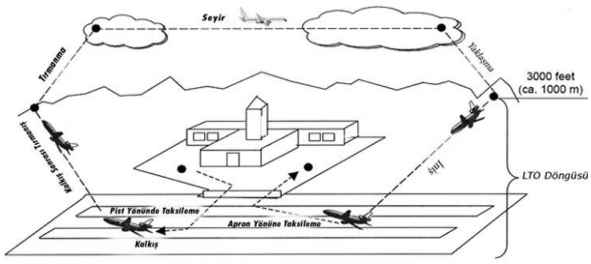
Asıl Yanma:

$$Hava \quad (N_2+O_2)+ \quad Yakıt \quad (C_nH_m+S)\rightarrow CO_2+H_2O+N_2+O_2+NO_x+UHC+CO+C_{soot}+SO_x$$

İdeal Yanma;

$$Hava \quad (N2+O2)+ \quad Yakıt \quad (CnHm+S)\rightarrow CO2+H2O+N2+O2+SO2$$

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO)'nun Annex 16 el kitabına göre LTO döngüsü dâhilinde emisyonlar yaklaşma, taksi, kalkış ve belli bir yüksekliğe tırmanma (3000 ft~1915 m) olarak dört farklı uçak hareketi neticesinde meydana gelmektedir (ICAO, 2017). Aşağıdaki şekilde standart LTO döngüsü gösterilmektedir (IPCC, 1997a). İlgili döngü taksi çıkışı, kalkış, tırmanmaya başlama, tırmanma, seyir, alçalma, son yaklaşma, iniş ve taksi olarak 9 kısımdan meydana gelmektedir (ICAO, 1995). Aslında hava araçlarından uçaklar için gerçekleşen faaliyetler, uçağın motor çalıştırmasından itibaren başlar ve en son iniş ve taksi yapmasından sonra motor kapatmasına kadar devam eder. Dolayısıyla havacılıktan kaynaklanan egzoz emisyonlarının da yakıtın yanmaya başladığı motor çalıştırma evresi ile başladığı düşünülebilir.



Şekil 1. LTO Döngüsü (IPCC, 1997a).

Uçaklar için belirtilen uçuş hareketleri hakkındaki faaliyetler, yakıt kullanımına başlandığı ve emisyon envanterlerinin hesaplanabildiği taksi kalkış ve tırmanma başlangıcının olduğu kalkış faaliyetleri bölümü, tırmanış seyir ve alçalış hareketlerinin olduğu CCD faaliyetleri bölümü ve son yaklaşma, iniş ve taksi giriş hareketlerinin olduğu varış etkinlikleri bölümü olarak üç kısımda açıklanmaktadır (ICAO, 1995).

Havacılık sektöründe kullanılan uçaklardan kaynaklanan egzoz emisyonlarının hesaplama metotları IPCC'nin belirttiği üç değişik yöntem ile yapılabilmektedir (IPCC, 1997a). Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 emisyon hesaplama yöntemleri içinde en çok kullanılanı Tier 2 yöntemidir ve uçakların tiplerine göre LTO döngülerinden faydalanılarak emisyonların hesaplanması olarak açıklanmaktadır. IPCC (Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli), Birleşmiş Milletler topluluğunun iki ayrı organizasyonu olan Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) ve Dünya Meteoroloji Örgütü'nün (WMO) beraber çalışılması neticesinde oluşturulmuştur (IPCC, 1991). Amacı insan faaliyetleri neticesinde oluşan hava bozulmasının çıkarabileceği risklerin değerlendirilmesi olan bu özerk kuruluş, bünyesinde çalışmakta olan bilimsel kuruluşlar ve enstitülerdeki binlerce deneyimli ve uzmanla birlikte, iklim değişikliğinin anlaşılması amacıyla teknik, bilimsel, sosyal ve iktisadi bilgileri inceleyerek sürekli en güncel bilgilerle değerlendirmeler sonucu İklim Değişikliği Değerlendirme Raporları hazırlamaktadır. İlk raporunu 1990 tarihinde çıkaran organizasyon, genellikle beşer yıllık sürelerde sıralı olarak raporlar hazırlamaktadır. Hatta 1992 yılındaki Rio de Jenerio'da yapılan toplantıda 150 ülkenin onayıyla Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) imzalanarak en büyük global tehdit olarak iklim değişikliği kabul edilmiştir. Aslında bu sözleşmede asıl

iklim sistemine etkisi olan etkenin insan olduğu vurgulanarak oluşacak zararın düzenlenmesi hedeflenmektedir (IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997a). IPCC'nin yayınladığı çeşitli kitapçıklar bulunmaktadır. Bu kitapçıklarda global bir bilgi havuzu oluşturulabilmesi için verilerin nasıl toplanacağı, nasıl değerlendirileceği ve sonuçların ne şekilde bildirileceğine dair bilgiler bulunmaktadır. Bununla beraber raporlamalarda faydalanılacak tabloların ve hesaplamaların da nasıl yapılacağı, kullanılabilecek metodlar ve referans değerler de belirtilmektedir. Sera gazı envanterinin hesaplanmasında kullanılan başlıklar IPCC'ye göre enerji, sanayisel yöntemler, solvent ve farklı mamullerin kullanılması, ziraat, dünya coğrafyasının ve ormanlardan faydalanılması, çöpler ve umumi kılavuzluk ve raporlama olarak toplamda 7 ana başlık altında belirtilmiştir. Dolayısıyla konumuz gereği yakıt kullanımı olmasından dolayı bu araştırmada "enerji" adı altında belirtilen umumi, endüstriyel ve erişim kaynaklarının sebep olduğu emisyonlar kısmında bulunan içeriklerden faydalanılmıştır.

İlgili "enerji" başlığının alt başlığı olarak ulaştırma sektöründen kaynaklanan emisyonlar, aslında direkt olarak yakıtların yanmaları ile alakalıdır. CO_2 ile ilgili hesaplamalar diğer gazlara oranla daha net olarak yapılabilmektedir zira doğrudan yakıtın yanmasına bağlı bir gaz türüdür. Yanma neticesinde meydana gelen CO_2'in aslında kullanılan yakıtın verimli yakılması ile ilgili gösterge olduğu unutulmamalıdır. Zira CO_2 yanma faaliyetinin en doğal neticesinde meydana gelmektedir. Bu sebeple de ilgili gaz hesaplamaları, satış veya tüketim bilgilerinden faydalanılarak birkaç ekleme yardımıyla rahatlıkla hesaplanabilmektedir. Dünya geneli tüm ülkelerin yakıt tüketim değerleri, daha çok ticari araçlar sektörü olmak üzere bilinmektedir. Emisyon faktörleri de IPCC Kılavuzlarında önceden hesaplanarak belirlenmiş averaj kıymetlere sahiptir. Fakat her milli ülkenin envanter kısmında eğer imkânı olursa kendi emisyon faktörlerini hesaplayıp kullanması tavsiye edilmektedir.

IPCC tarafından hazırlanan emisyon hesaplama metodları, Tier olarak adlandırılmakta ve çeşitli kademelerde kısımlara ayrılmaktadır. Buradaki kademeyi belirleyen etken ilgili faaliyet alanı ve teknolojik detaylar olmaktadır. Üç farklı kısma ayrılan Tier hesaplamalarında Tier 1 metodu, genellikle daha az bilgiden oluşan en basit yöntem olarak bilinmektedir. Buna karşılık en son kademede olan Tier 3 metodu, daha fazla uzmanlık ve detaylı bilgiye ihtiyaç duyulan ve karmaşık bir yöntemdir. Aslında üç metodu Tier 1 ve diğerleri olarak da ayırmak mantıklı olacaktır çünkü Tier 2 ve Tier 3 yollarından temelde benzer mantıkla faydalanılmaktadır. Ne kadar faydalanılacak kısımlar ayrıntılı olursa bir üst yöntem olan Tier 2 veya Tier 3 kademesine geçileceği düşünülebilir.

Tier 1 yaklaşımında temel mantık herhangi bir yakıtın yanması sonucu emisyon oluşturmasıdır. Ulaştırma sektöründeki emisyon değerlerinin hesaplanması tamamen yakıtın yanması üzerine kurulmuştur. Dolayısıyla aslında bir diğer önemli etken olan kullanılan yanma teknolojisi hesaplamalara dâhil edilmemektedir. Temel mantık eğer bir ülkede belli bir oranda yakıt kullanılıyorsa bunun neticesi olarak da mutlaka belirli bir emisyon çıkacağı hesaplanmaktadır. Çoğunlukla CO_2 emisyonlarının hesaplanmasında bu metot iyi bir hesaplama şekli olarak kullanılmaktadır. Burada CO_2 harici gazlar için zahmetsiz bir usul hazırlanmıştır. Belirtilen gazların emisyonları için faydalanılan yakıt türü, yanma teknolojisi, kontrol teknolojisi, çalışma şartları, ilgili aracın yaşı ve diğer özellikleri gibi verilerin de aslında kullanılması gerekmektedir. Zira sarfiyat ve dolayısıyla emisyon oranları bu etkenler neticesinde değişebilmektedir. Buradaki sebep ise birçok ülkenin kendisine has ve detaylı verilere sahip olmaması nedeniyle farklı özellikler ve iyileştirmeler yapılmadan yaklaşık sonuç alınması tasarlanan bir öngörü metodunun kullanılmasıdır (IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997b). Aslında insan kaynaklı meydana gelen en büyük oranlı sera gazı olarak karbondioksit gösterilmektedir. CO_2'e ait emisyonun açığa çıkmasındaki en büyük etken ise fosil yakıtların yakılması neticesindeki karbonun oksitlenme durumudur. Yine aynı raporlara göre insan faaliyetleri neticesinde oluşan fosil yakıtların yakılması, CO_2 emisyonlarındaki oranın yaklaşık % 70 ile % 90'lık kısmını oluşturmaktadır. CO_2 emisyon hesaplamasında ilk olarak her sektöre ait yakıt harcama değeri belirlenir. Sonra belirlenen bu yakıt harcama değerine ait kuvvet içerikleri bulunur. Daha sonra her yakıt çeşidi için uyumlu karbon emisyon faktörleri seçilerek belirlene bu değerler ile yakıtın içeriğinde bulunan toplam karbon miktarı hesaplanır. Sonraki aşamada ilgili yakıtın yanması aşamasında oksitlenmeyen karbon miktarları bulunarak tamamıyla yanmaya dâhil olan karbon değeri bulunur. En son aşamada ise net karbon değeri, karbonun molekül ağırlığının CO_2'in moleküler ağırlığına oranı şeklinde hesaplanarak CO_2 biçimine çevrilir. Buradaki referans planlamaya göre yakıt tüketim değerleri aşağıda belirtilen formüller yardımıyla hesaplanmaktadır (eşitlik 1 ve 2).

$$\text{Esas Yakıt Tüketimi} = Pr + Im - Ex - IB - SC \quad (1)$$

$$\text{Tali Yakıt Tüketimi} = Im - Ex - IB - SC \quad (2)$$

Formülde belirtilen Pr : Üretilen yakıt değeri; Im: İthal edilen yakıt değerini; Ex: İhraç edilen yakıt değeri; IB: Uluslararası faydalanma amacıyla satılan yakıt değerini; SC: Stoklarda oluşan değişim değerini göstermektedir. Formül başlıklarından birincil yakıt olarak belirtilen kısımda kömür, doğalgaz, ham petrol gibi doğada bulundukları biçimleriyle kullanılan yakıt türleri gruplandırılmaktadır. İkincil yakıt kısmında ise birincil yakıtlardan üretilen yağlayıcı ve benzin gibi akaryakıt ürünleri belirtilmektedir. Yine hesaplamalarda birincil yakıtların üretim değerleri alınırken ikincil yakıtların üretim değerleri hesaplamalara dâhil edilmemektedir. Zira ikincil olarak adlandırılan yakıtlar da esas olarak belirtilen yakıtlardan üretildiğinden tekrar tüketim değerine eklenmeleri mantık hatasına yol açmaktadır.

Sadece ithal edilen ikincil yakıtlar olması durumunda ilgili değerler hesaba dâhil edilmelidir (IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997). Bu çalışmada birincil yakıtların hesaba katılmama sebebi, ulaşım sektöründe birincil yakıtların doğrudan kullanılmamasından dolayıdır. Zira havacılık sektöründe ikincil biçimdeki yakıtlar, hava araçları tarafından kullanılmakta, dolayısıyla hesaplamalarda resmi kurumlardan alınan tüketim değerleri ile aynı çıkması muhtemeldir. İkinci adımda IPCC kılavuzunda gösterilen dönüşüm faktörleri ile yakıt tüketim değerlerine ait dönüşüm faktörleri çarpılarak ilgili yakıt grubunun kuvvet kapsamı hesaplanır. Eğer ilk kısımda faydalanılan yakıt harcama değerleri enerji biçiminde alınmışsa (TJ) ayrıca bu kısımda hesaplama yapılmasına ihtiyaç olmayacaktır. Fakat ilk adımda alınan yakıt harcama değerleri kütle cinsinden (kg, ton) alınmışsa net kalori değerlerine ait dönüşüm faktörleri çarpılarak TJ yani enerji birimine çevirim sağlanır. Aşağıdaki Tablo 1'de IPCC kılavuzunda gösterilen ve Türkiye'deki emisyon hesaplamalarında da faydalanılan net kalori rakamlarından bir kısmı belirtilmektedir (IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997b).

Tablo 1. Yakıtlara ait net kalori değerleri (Dönüşüm Faktörleri)*

Yakıt	Net Kalori Değerleri (TJ/kt)
Benzin (Havacılık ve Otomotiv)	44,80
Jet Yakıtı	44,59
Motorin (Dizel Yakıt)	43,33
Fuel Oil	40,19
LPG	47,31

*IPCC Kılavuzu, 1997b.

Daha sonra karbon emisyon faktörlerinden yararlanarak yakıtların karbon içerikleri bulunmaktadır. IPCC aslında karbon emisyon rakamlarının her ülkenin kendi başına hesaplamasını tavsiye etmektedir. Fakat her ülkenin bu hesaplamaları yapacak imkân ve zamanı olmamaktadır. Dolayısıyla IPCC bunu düzenleme adına bu ülkeler için ortalama rakamlar belirtmektedir. Bu çalışmada Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın hazırladığı, 2010 yılında IPCC'ye teslim edilen Türkiye Ulusal Sera Gazı Resmi Envanterinden faydalanılan ve aşağıdaki Tablo 2'de belirtilen değerler kullanılacaktır. Karbon emisyonunun miktarı, karbon emisyon faktörü ile hesaplaması evvelki adımda yapılan yakıt sarfiyat değerinin çarpılması neticesinde bulunmaktadır. Ton karbon cinsinden elde edilen emisyon değeri, 1000 rakamına bölünerek Gg birimine geçiş yapılır.

Toplam karbon aşağıdaki formüle göre hesaplanır (eşitlik 3).

$$\text{Toplam Karbon (Gg C)} = \text{ET (TJ)} \times \text{CEF (t C/TJ)} \times 10^{-3} \quad (3)$$

Bu formülde; ET: Enerji tüketimini (TJ biriminde); CEF: Karbon emisyon faktörünü (ton karbon/TJ biriminde) göstermektedir. Kullanılan üç hesaplama yaklaşımından Tier 2 ile Tier 3 yaklaşımlarının Tier 1 yaklaşımından temel farkları, Tier 1 yönteminde kullanılan yakıtların yanma teknolojileri hakkında herhangi bir bilgi sahibi olunmasına gerek olmadığı, dolayısıyla kolaylıkla öğrenilebilen yakıt dağıtım veya tüketim değerlerinin kullanılabilmesidir. Diğer yöntemler arasındaki farkın belirlenebilmesi ise daha zordur. Emisyon hesaplama işlemlerinin daha da iyileştirilmesi neticesinde bir hesaplama yönteminden diğerine geçiş yapılmıştır. Tier 2 hesaplamalarında daha uygun emisyon faktörlerinin kullanılabilmesi amacıyla yakıt tüketim gruplarının ayrıştırılması amaçlanmaktadır. Tier 3 hesaplamasında ise ulaştırma sektörü bağlamında kullanılan yakıtların tüketim rakamlarından farklı biçimde kullanılan araçların gittikleri yol mesafeleri veya km-ton cinsinden taşınan yükün değeri gibi etkenler hesaplamalara dâhil edilerek bunlara uygun olan emisyon faktörlerinin desteği ile hesaplamalar yapılabilir (IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997). Herhangi bir taşıma sektöründeki kullanılan taşıtların oluşturduğu emisyonların hesaplanabilmesi için bazı parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Karmaşık bir işlem de olsa taşımacılık sektöründeki taşıtlarda bulunulan kategori, harcanan yakıt miktarı, çalışma şartları, emisyon denetim düzeyi ve taşıtların yaşları gibi farklı etkenlerin bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Genel olarak emisyon değerlerinin hesaplanma formülü aşağıda gösterilmiştir ve formülde kullanılan EF emisyon faktörünü, Aktivite harcanan enerji miktarını ya da taşıtın gittiği yol mesafesini, a harfi taşıtta kullanılan dizel, benzin veya jetA1 gibi yakıt tipini, w harfi otomobil, kamyon gibi taşıt tipini, c harfi ise emisyon kontrol özelliklerini göstermektedir (eşitlik 4).

$$\text{Emisyonlar} = \Sigma(EF_{awc} \times Aktivite_{awc}) \quad (4)$$

Tablo 2. Karbon emisyon faktörleri (CEF)*

Yakıt	Karbon Emisyon Faktörü (tC/TJ)
Benzin	18,9
Jet Yakıtı	19,5
Motorin (Dizel Yakıt)	20,2
LPG	17,2
Doğal Gaz (Kuru)	15,3

*IPCC Kılavuzu, 1997b.

Hava taşımacılığı ile ilgili emisyon hesaplamalarında kullanılan faaliyet değerleri, ticari sivil hava taşımacılığında kullanılan yolcu ve yük taşımacılığı işlemlerini belirtmektedir. Dolayısıyla özel veya askeri kullanımdaki hava araçları bu taşımacılığa dâhil edilmemektedir. Hava taşımacılığındaki çalışma şartları iniş/kalkış faaliyetleri ve seyir faaliyetleri olarak iki biçimde açıklanmaktadır. İniş/kalkış faaliyetlerinin İngilizce karşılığı Landing/Take Off olduğu için kısaca LTO olarak adlandırılmaktadır. Bu kısım hava araçlarının 3000 feet yani yaklaşık 914 m yüksekliğe kadar ve dolayısıyla havalimanı civarında gerçekleştirdikleri ve hava aracı motorlarının çalışır durumda olduğu yolcu indirme, yolcu bindirme, bekleme, tırmanma ve iniş faaliyetlerini kapsamaktadır. Çalışmada tüm bu faaliyetlerin tamamı

her seferinde bir LTO sayısı olarak kısaltmalar ile kullanılacaktır (IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997a). İkinci kısımdaki seyir faaliyetlerinde ise hava araçlarının 3000 feet üzeri bütün faaliyetleri gösterilmektedir. İlgili faaliyetlerde herhangi bir üst sınır olmamakla birlikte 3000 feet üzerindeki tırmanma, düz uçuş ve iniş aktiviteleri gibi seyir halindeki bütün faaliyetleri kapsamaktadır. Bu hesaplamalar yapılırken uluslararası uçuşlar, ulusal emisyon envanteri hesaplamalarına dâhil edilemez. Dolayısıyla yalnızca yurt içi uçuşlara ait faaliyetlerin emisyon hesaplamaları dâhil edilebilir. Ek olarak uluslararası bir uçuşta hava aracı eğer bir ülkenin havalimanından kalkış yapıp sonrasında yine aynı ülke içinde başka bir havalimanına inerek devamında yurt dışı başka bir havalimanına gidiyorsa sadece ilk uçuş yurt içi uçuş sayılarak emisyon hesaplamasına dâhil edilebilir (IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997). LTO'ya ait emisyon faktörleri, kısa adı ICAO olan Uluslararası Sivil Havacılık Kurumu veri tabanından seçilebilir. Bu sebeple tüm emisyon hesaplamalarında IPCC kılavuzunca bulunan ortalama değerlerden faydalanılacaktır.

Hava taşımacılığı sektöründeki emisyon hesaplamasında kullanılan Tier 2 metodunda IPCC kılavuzuna göre yalnızca jet yakıtı kullanan hava araçlarının faaliyetleri kullanılabilir. Çünkü küçük uçak tiplerinde jetA1 olarak adlandırılan yakıt kullanılmamakta onun yerine uçak benzini kullanılmaktadır ve bu tarz uçaklar havacılıkta kullanılan tüm yakıtın %1 gibi çok küçük bir oranını kapsamaktadır. Asıl ağırlıklı kısım olan JetA1 yakıt türü bu hesaplamalarda daha etkili olarak kullanılmaktadır. Buradaki kullanımlardaki emisyon hesaplamalarında hava araçlarının motor tipleri, verimlilikleri, uçuş süreleri ve kullanılan yakıt tipi etken olarak görülmektedir. Ayrıca enerji kullanımı nedeniyle meydana gelen emisyon miktarları, hava araçlarının çalışma şartlarına ve LTO'daki harcadığı zamanda göre de değişebilmektedir. Sürekli ana kaynak alınan IPCC (1997a) raporlarına göre ulusal havacılık sektöründe meydana gelen NO_X miktarının %60 ile %80'lik kısmının, SO_2 ve CO_2'nin ise %80 ile %90'lık oranları 3000 feet üzerindeki yüksekliklerde ortaya çıkmaktadır. VOC bakımından %20 ile %40 ve CO bakımından ise %50 olarak bu değerin oluştuğu yine ilgili raporlarda belirtilmektedir (IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997a). Dolayısıyla bütün bu emisyon oluşumlarının yaklaşık %80 ile %90'lık oranları 3000 feet üzerindeki uçuş faaliyetleri sırasında meydana gelmektedir. Hesaplamalarda Türkiye'deki en üst düzey havacılık kuruluşları olan Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) ve Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMİ) tarafından yayınlanan resmi raporlardan alınan uçuş verileri temel alınacaktır. İlgili raporlardaki iç hat uçuşları baz alınarak LTO sayıları, LTO başına düşen yakıt harcama rakamları ile çarpılarak LTO'ya bağlı yakıt tüketimlerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Hava araçlarına ait emisyon faktör değerleri ise 2006 yılında IPCC tarafından yayınlanan kılavuzdan alınarak hesaplamalara dâhil edilecektir. İlgili IPCC Kılavuzu emisyon faktörleri aşağıdaki Tablo 2'de gösterilmektedir (IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997).

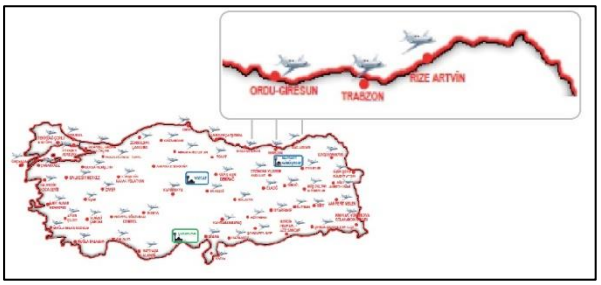
Literatüre bakıldığında Lund vd.'nin (2017) Dünya'daki farklı bölgelerde havacılık kaynaklı ozon, metan, aerosol gibi emisyonların iklim değişikliği ve sıcaklık üzerinde etkilerini inceledikleri çalışma görülmektedir. Çalışma neticesinde uçak motorlarındaki yanma işlemi neticesinde gökyüzünde oluşturduğu izlerin kimi bölgelerde 100 yıl boyunca kalabildiği ve küresel ısınmaya neden olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Diğer çalışmada Kaya ve Aydin (2022), 2011 ve 2018 döneminde havayolu işletmelerinin karbondioksit verimliliklerini Atmosfair verilerinden faydalanarak incelemişlerdir. Çalışma neticesinde 2018 yılı itibariyle karbondioksit verilerinde herhangi bir iyileşme olmadığı sonucuna ulaşarak işletmelerin bu konuda verimliliklerini artırmalarına yönelik önerilerde bulunmuşlardır. Buna benzer uçak emisyonlarının nispeten kentselleşmenin fazla olduğu yerlerdeki hava kalitesi üzerinde oluşturduğu negatif etkiler bulunduğu ve bu durumun biyosferi olumsuz yönde etkilediği Kuzu (2018) tarafından belirtilmiştir. Önemli bir kuruluş olarak bilinen ATAG (2021) raporlarında da 2050 yılında her sene ortalama 10 milyar yolcunun havayolu ile seyahati kullanacağı belirtilmektedir. Bunun ise eğer havacılık, yakıt ve teknoloji alanlarında herhangi bir gelişme yapılmaması durumunda 2000 megatona yakın karbondioksit emisyonuna yol açacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca diğer çalışmalarda havacılık sektörünün büyürken sürdürülebilir bir altyapıya da gereksinim duyacağını ortaya koymaktadır. Pecorari vd.'nin (2016) yaptıkları araştırmada uçuşların yol açtığı emisyonların hesaplanması ve çevreye olası etkileri üzerinde durulmuştur. İlgili çalışmada sadece havalimanlarının değil, havalimanı yakınlarındaki yerleşim yerlerinin de etkilendiği ortaya çıkarılmıştır. Bir diğer sonuç ise sadece dış etkilenme değil, havalimanlarındaki iç etkilerin de araştırılması, gelecekteki yaşanacak artışların hava kalitesini etkileyebileceği önemli olarak gösterilmiştir. Yine belirtilen diğer çalışmalardan Schürmann vd. (2007), Almanya'nın Zürih kentindeki havalimanında özellikle uçakların taksi yollarındaki operasyonları neticesinde oluşan kirletici karışımların etkilerini araştırdıkları görülmektedir. Araştırma neticesinde terminal alanında yüksek miktarda karbondioksit bulunduğu ortaya çıkarılarak, uçuş kaynaklı emisyonların yalnızca havalimanları çevresinde değil, yakınlarındaki yerleşim alanlarını ve havalimanı terminallerinin iç kısımlarını etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Farklı bir araştırma olarak Ashworth vd. (2020), seyir sırasında emisyon ölçümü yaparak Londra şehri üzerinde 3 farklı uçuşta veriler elde etmiştir. Veri sonuçlarında hava kalitesi ve kirleticileri araştırılmış, özellikle Heathrow Havalimanı'ndaki uçak trafiğinin dış kesimlerde yüksek NO_X oluşumu meydana getirdiği sonucuna ulaşmışlardır. Akça'nın (2020), yaşanılan Covid 19 pandemisindeki uygulanan havacılık sektörü kısıtlamaları neticesinde hem sefer hem de yolcu sayılarında düşüş yaşandığından bahsettiği çalışması bulunmaktadır. Çalışma neticesinde

pandemi döneminde alınan tedbirlerin ve kısıtlamaların, sektörü derinden etkileyerek dolaylı olarak karbon salınımının azalmasına yol açtığı belirtilmiştir.

3. Materyal ve Yöntem

IPCC tarafından yapılan ve emisyon hesaplamalarında kullanılan 3 yöntemden Tier 1 ve Tier 2 metodları, diğer metoda göre daha az veriye ihtiyaç duyulmasından dolayı tercih edilmektedir. Kısaca Tier 1 yönteminde LTO ve 3000 feet üzeri uçuşlardaki tüketilen yakıt miktarı direkt olarak emisyon faktörü ile çarpıldığından hesaplamada esas olarak yakıt tüketimi dikkate alınmaktadır ve yakıtın çeşidi ve miktarı, emisyon faktörü ile hesaplanır (IPCC, 1991). Bir gelişmiş hesaplama olan Tier 2 yönteminde ise hava araçlarının kullanımı neticesinde oluşturdukları emisyon miktarları da hesaplamalara katıldığından bu yöntemin yapılabilmesi için daha fazla bilgiye gereksinim duyulmaktadır. Buna karşılık ise Tier 2 yöntemi daha hassas neticeler vermektedir. Babaoğlu ve Özgünoğlu'na (2017) göre Tier 2 metodu, jet yakıtı kullanan hava araçlarının emisyon hesaplamalarında LTO ile uçak bilgileri de alınarak kullanılmaktadır ve LTO emisyon faktörü ile LTO sayısının çarpımı neticesinde daha hassas neticeler vermektedir. Çalışmada öncelikle ilgili uçakların tipleri, uçuş tarihleri ve LTO sayılarına yönelik veriler raporlanmıştır. Daha sonra ilgili formüllerden faydalanılarak hesaplamalar yapılmış ve neticeler açıklanmıştır.

Emisyon değerleri ve çevreye etkileri bakımından hava araçlarının meydana getirdiği uçak emisyonları konusu, gün geçtikçe önemi daha fazla anlaşılacak ve ileride daha fazla etkilerinin araştırılacağı bir alan olacaktır. Çalışmanın özgünlüğü Türkiye'de temiz havasıyla bilinen Doğu Karadeniz bölgesindeki en yoğun kullanımda olan Trabzon (TZX), Rize-Artvin (RZV) ve Ordu-Giresun (OGU) havalimanlarında 2019-2023 yıllarında gerçekleşen LTO süreçleri dâhilindeki uçuşlardan kaynaklanan emisyon değerlerinin hesaplanmasına dayanmaktadır. Diğer havalimanlarına oranla daha yeni açılmış olan Rize-Artvin (RZV) havalimanının da hesaplamaya dâhil edilmesi, konum olarak aynı bölgede bulunmasından dolayıdır. Bununla beraber DHMİ raporlarında ülkemizde son yıllarda en fazla kullanımı olan uçak tiplerinden B738, A321, A20N, A21N ve A320 tipli uçakların oranlamaları, hesaplamalarda kullanılmıştır (DHMİ, 2024: 152). Çalışmada ilgili uçaklardan kaynaklanan emisyon gazları (HC, CO ve NO_X) belirtilen havalimanlarında, ICAO'nun yayınladığı yakıt oranları ve emisyon faktörlerine göre Tier 2 yönteminden faydalanılarak hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan zaman periyodunda pandemi döneminin olmasının, uçuş sayıları bakımından bazı neticeleri etkilemesine rağmen özellikle 2023 yılının gerçek rakamları göstereceği düşünülmektedir.



Şekil 2. Havalimanlarının harita gösterimi (DHMİ, 2024: 11).

4. Bulgular ve Tartışma

Devlet Hava Meydanları İşletmesi'nin (DHMİ) her yıl yayınladığı raporların kaynak alındığı çalışmada ilgili işletmenin 2024 tarihli 2023 yılı raporuna göre Türkiye'deki uçak trafiğinin uçak tiplerine göre dağılım sıralamasında birinci olarak Boeing 737-800 %26'lik bir oranla yer alırken, sırasıyla % 11'lik oranla Airbus A321, %9'luk oranla Airbus A320 Neo, %8'lik oranla Airbus A321 Neo ve %7'lik oranla da Airbus A320 gelmektedir (DHMİ 2024: 152). 2022 yılına bakıldığında ilk sırada %29'luk oranla yine Boeing 737-800 yer almakta ve bu uçak tipini sırasıyla %10'luk oranla Airbus A321, %8'lik oranla Airbus A320 ve % 5'lik oranla Cessna 172 tipli uçaklar takip etmektedir (DHMİ, 2023: 138). 2021 yılında ise ilk sırada %31'lik oranla Boeing 737-800 gelirken ikinci sırada %9'luk oranla Airbus A320 Neo, üçüncü ve dördüncü sıralarda % 8'lik oranlarla Airbus A321 ve A320, % 6'lık oranla ise yine Cessna 172 tipli uçakların kullanıldığı anlaşılmaktadır (DHMİ, 2022: 132). Covid 19 sürecinin yaşandığı 2020 yılı raporlarına göre en fazla kullanılan uçak tipleri sıralamasında % 35 ile yine Boeing 737-800 yer alırken ikinci sırada %8'lik oranla Airbus A320 Neo ve Cessna 172, dördüncü ve beşinci sıraları % 7'lik oranlarla Airbus A320 ve A321 modelli uçaklar almaktadır (DHMİ 2021: 136). Son olarak pandeminin yoğun yaşandığı ilk dönem olan 2019 yılı istatistiklerine bakıldığında ise ilk sırada % 39 ile Boeing 737-800 yer alırken, ikinci sırada % 13 ile Airbus A321, üçüncü sırada ise % 10'luk oranla Airbus A320 olduğu görülmektedir (DHMİ, 2020: 130). Çalışmadaki hesaplamalarda en fazla kullanılan uçak tiplerinden Boeing 737-800, Airbus A320 ve Airbus A321 tipli hava araçlarının istatistiklerinden faydalanılacaktır. İlgili uçak tiplerine göre uçuş sayıları alınırken de yine Devlet Hava Meydanları İşletmesinin en son yayınlanan 2024 yılı uçuş sayıları resmi rakam olarak hesaplamalara dâhil edilecektir.

Trabzon (TZX), Rize-Artvin (RZV) ve Ordu-Giresun(OGU) havalimanlarıyla ilgili Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMİ)'nin hazırladığı yıllık raporları istinaden hazırlanan uçuş trafik bilgileri Tablo 3, 4, 5 ve 6'da gösterilmektedir. Raporlarda özellikle son iki yıl içinde uçuş sayılarının arttığı görülmektedir. Ayrıca Rize-Artvin (RZV) havalimanının açılış tarihi 2022 olmasından dolayı raporlamalarda önceki yıllarda herhangi bir uçuş verisi bulunmamaktadır. 2019 yılında başlayan ve etkilerinin 2022 yılına kadar sürdüğü bilinen Covid 19 pandemisinin

de tablolardaki verilere ilk başlarda negatif, salgının bitişinden sonra ise pozitif etkilerinin olduğu da anlaşılmaktadır. Sadece ilgili dönem değil, son yıllarda da ülkemizde en fazla kullanılan uçak tipi olan Boeing 737-800'lerin kullanım sıklıklarının çok fazla değişmediği, bunun yanında diğer uçak tiplerinin nispeten yeni versiyonları olan Neo modelleri ile Türkiye pazarına girdikleri görülmektedir. Türkiye geneli oranlarda başka uçak modellerinin de istatistiklere yansıdığı, nispeten eğitim uçakları olarak kullanılan Cessna 172 tipli uçakların da özellikle eğitim uçuşu yapılan meydanlardaki kullanımının bir hayli fazla olduğu anlaşılmaktadır. Daha geniş çalışmaların yapılması anlaşımda diğer uçak tiplerinin de dikkate alınarak araştırmaların genişletilmesi, ileride yapılacak çalışmalarda genel ortalama alınırken pandemi döneminin istatistiklere yansıtılmaması daha güncel ve doğru veri oluşturulması hedefinde önerilebilir.

Tablo 3. Türkiye'de Trabzon (TZX), Rize-Artvin (RZV) ve Ordu-Giresun (OGU) havalimanları ticari uçuş trafiği*

Havalimanı	Dön.	2019	2020	2021	2022	2023
Trabzon (TZX) Havalimanı	İç H.	21.305	12.856	17.632	16.966	18.987
	Dış H.	4.421	1.307	3.326	6.529	7.768
	Top.	25926	14.163	20.958	23.495	26.755
Rize-Artvin (RZV) Havalimanı	İç H.	0	0	0	3.724	7.355
	Dış H.	0	0	0	36	109
	Top.	0	0	0	3.760	7.464
Ordu-Giresun (OGU) Havalimanı	İç H.	7.773	4.857	5.781	6.194	7.075
	Dış H.	206	148	29	175	235
	Top.	7.979	5.005	5.810	6.369	7.310

*DHMİ, 2024: 148-149.

Tablo 4. Türkiye'de Trabzon (TZX) Havalimanı uçak tiplerine göre uçuş trafiği*

		Trabzon (TZX) Havalimanı			
Uçak Tipleri/Dönem		Boeing 737-800	Airbus A 321	Airbus A 320	Toplam
2019	%	39%	13%	10%	62%
	Uçuş Sayısı	8.309	2.770	2.131	13.209
2020	%	35%	7%	7%	49%
	Uçuş Sayısı	4.500	900	900	6.299
2021	%	31%	8%	8%	47%
	Uçuş Sayısı	5.466	1.411	1.411	8.287
2022	%	29%	10%	8%	47%
	Uçuş Sayısı	4.920	1.697	1.357	7.974
2023	%	26%	11%	7%	44%
	Uçuş Sayısı	4.937	2.089	1.329	8.354
Toplam Uçuş Sayısı		28.131	8.865	7.127	44.124

*DHMİ, 2024: 148-149.

Tablo 5. Türkiye'de Rize-Artvin (RZV) havalimanı uçak tiplerine göre uçuş trafiği*

		Rize-Artvin (RZV) Havalimanı			
Uçak Tipleri/Dönem		Boeing 737-800	Airbus A 321	Airbus A 320	Toplam
2019	%	0%	0%	0%	0%
	Uçuş Sayısı	0	0	0	0
2020	%	0%	0%	0%	0%
	Uçuş Sayısı	0	0	0	0
2021	%	0%	0%	0%	0%
	Uçuş Sayısı	0	0	0	0
2022	%	29%	10%	8%	47%
	Uçuş Sayısı	1.080	372	298	1.750
2023	%	26%	11%	7%	44%
	Uçuş Sayısı	1.912	809	515	3.236
Toplam Uçuş Sayısı		2.992	1.181	813	4.986

*DHMİ, 2024: 148-149.

Tablo 6. Türkiye'de Ordu-Giresun (OGU) havalimanı uçak tiplerine göre uçuş trafiği

Ordu-Giresun (OGU) Havalimanı					
Uçak Tipleri/Dönem		Boeing 737-800	Airbus A 321	Airbus A 320	Toplam
2019	%	39%	13%	10%	62%
	Uçuş Sayısı	3.031	1.010	777	4.819
2020	%	35%	7%	7%	49%
	Uçuş Sayısı	1.700	340	340	2.380
2021	%	31%	8%	8%	47%
	Uçuş Sayısı	1.792	462	462	2.717
2022	%	29%	10%	8%	47%
	Uçuş Sayısı	1.796	619	496	2.911
2023	%	26%	11%	7%	44%
	Uçuş Sayısı	1.840	778	495	3.113
Toplam Uçuş Sayısı		10.159	3.211	2.571	15.940

Kaynak: (DHMİ, 2024: 148-149).

Uçuşlar ve kullanılan uçak tipleri bakımından eldeki veriler neticesinde oluşan CO_2 miktarları, kullanılacak formüller neticesinde yapılacak emisyon hesaplamalarıyla bulunabilmektedir. Daha önce de belirtilen IPCC'nin yayınladığı hesaplama yöntemlerinden Tier 2 metodunun bu veriler dâhilinde kullanılması, mantıklı sonuçların alınması bakımından uygun görülmüştür. Tier 2 metoduna göre hazırlanan tablolarda öncelikle dikkate alınan uçak tiplerinin CO_2 ve diğer emisyon değerleri aylık olarak hesaplanmıştır. Daha sonra yine IPCC (2006)'nin yayınladığı resmi verilere göre Tablo 7'de uçak tiplerinin neden olduğu kükürt dioksit salınım değerleri ve oranları belirtilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm değerler, Hükümetler arası İklim Değişikliği Panelinin (IPCC) düzenlediği kılavuzda "Enerji" başlığı altında belirtilen yakıt yakılması emisyon değerleri kısmından alınmıştır. Daha önce de belirtilen Tier 1, 2 ve 3 metodları ulaştırma sektörünün sebep olduğu emisyonlardaki yanma şartlarını, uygulanan teknolojileri, yakıtların özelliklerini ve emisyon standartlarını hesaplayabilmek amacıyla hazırlanmış ve genel kullanıma sunulmuştur. Araştırmacılar veya resmi organların emisyon hesaplamalarında ellerindeki verilerin çeşitliliği ve çokluğu, kullanılacak metotların seçiminde yönlendirici olmaktadır. İlk hesaplama formülü olan Tier 1 metodunda formül (eşitlik 4):

Emisyon Miktarı = Emisyon Faktörü X Yakıt Tüketimi (4)

Daha fazla veri ve detay bilinmesi durumunda ise Tier 2 metodundan faydalanılması, alınacak neticelerin daha doğru ve bilimsel olması bakımından önemlidir. Tier 2 metodu yalnızca jet motora sahip hava araçlarının emisyon hesaplamalarında kullanılmaktadır. Elimizdeki veriler hem LTO sayılarını hem de uçak tiplerine ait olduğundan çalışmada bu metodu kullanabilmemiz mümkün olmaktadır. Tier 2 metodunda kullanılan formül (eşitlik 5):

LTO Emisyonu = LTO Sayısı X LTO Emisyon Faktörü (5)

Trabzon (TZX), Rize-Artvin (RZV) ve Ordu-Giresun (OGU) havalimanlarında ilgili uçakların yaptığı uçuşların emisyon oranları, özellikle eldeki verilen çokluğu ve doğruluğundan dolayı Tier 2 metodundan faydalanılarak hesaplanmış ve uçak tiplerine ve havalimanlarına göre ayrı Tablo 8-16'da gösterilmiştir.

Tablo 7. Farklı uçak tiplerine göre IPCC tarafından hazırlanmış emisyon faktörleri ve yakıt tüketimleri*

Uçak Tipleri	Boeing 737-800	Airbus A 321	Airbus A 320
CO_2	2780	3020	2440
CH_4	0,07	0,14	0,06
N_2O	0,1	0,1	0,01
NO_X	12,30	16,72	9,01
CO	7,07	7,55	6,19
NMVOC	0,65	1,27	0,51
SO_2	0,88	0,96	0,77
Yakıt Tüketimi	880	960	770

*IPCC, 2006.

Tablo 8. Trabzon (TZX) havalimanı 2019-2023 dönemi emisyon oranları (Boeing 737-800)

Trabzon Havalimanı (TZX) 2019-2023 Dönemi - Boeing 737-800					
Dönem	2019	2020	2021	2022	2023
LTO Sayısı	8.309	4.500	5.466	4.920	4.937
CO_2	23.099.020	12.510.000	15.195.480	13.677.600	13.724.860
CH_4	582	315	383	344	346
N_2O	831	450	547	492	494
NO_X	102.201	55.350	67.232	60.516	60.725
CO	58.745	31.815	38.645	34.784	34.905
NMVOC	5.401	2.925	3.553	3.198	3.209
SO_2	7.312	3.960	4.810	4.330	4.345
Yakıt Tüketimi (KG/LTO)	7.311.920	3.960.000	4.810.080	4.329.600	4.344.560

Tablo 9. Trabzon (TZX) havalimanı 2019-2023 dönemi emisyon oranları (Airbus A 321)

Trabzon Havalimanı (TZX) 2019-2023 Dönemi - Airbus A 321					
Dönem	2019	2020	2021	2022	2023
LTO Sayısı	2.770	900	1.411	1.697	2.089
CO_2	8.365.400	2.718.000	4.261.220	5.124.940	6.308.780
CH_4	388	126	198	238	292
N_2O	277	90	141	170	209
NO_X	46.314	15.048	23.592	28.374	34.928
CO	20.914	6.795	10.653	12.812	15.772
NMVOC	3.518	1.143	1.792	2.155	2.653
SO_2	2.659	864	1.355	1.629	2.005
Yakıt Tüketimi (KG/LTO)	2.659.200	864.000	1.354.560	1.629.120	2.005.440

Tablo 10. Trabzon (TZX) havalimanı 2019-2023 dönemi emisyon oranları (Airbus A 320)

Trabzon Havalimanı (TZX) 2019-2023 Dönemi - Airbus A 320					
Dönem	2019	2020	2021	2022	2023
LTO Sayısı	2.131	900	1.411	1.357	1.329
CO_2	5.199.640	2.196.000	3.442.840	3.311.080	3.242.760
CH_4	128	54	85	81	80
N_2O	21	9	14	14	13
NO_X	19.200	8.109	12.713	12.227	11.974
CO	13.191	5.571	8.734	8.400	8.227
NMVOC	1.087	459	720	692	678
SO_2	1.641	693	1.086	1.045	1.023
Yakıt Tüketimi (KG/LTO)	1.640.870	693.000	1.086.470	1.044.890	1.023.330

Tablo 11. Rize-Artvin (RZV) havalimanı 2019-2023 dönemi emisyon oranları (Boeing 737-800)

Rize-Artvin Havalimanı (RZV) 2019-2023 Dönemi - Boeing 737-800					
Dönem	2019	2020	2021	2022	2023
LTO Sayısı	0	0	0	1.080	1.912
CO_2	0	0	0	3.002.400	5.315.360
CH_4	0	0	0	76	134
N_2O	0	0	0	108	191
NO_X	0	0	0	13.284	23.518
CO	0	0	0	7.636	13.518
NMVOC	0	0	0	702	1.243
SO_2	0	0	0	950	1.683
Yakıt Tüketimi (KG/LTO)	0	0	0	950.400	1.682.560

Tablo 12. Rize-Artvin (RZV) havalimanı 2019-2023 dönemi emisyon oranları (Airbus A 321)

Rize-Artvin Havalimanı (RZV) 2019-2023 Dönemi – Airbus A 321					
Dönem	2019	2020	2021	2022	2023
LTO Sayısı	0	0	0	372	809
CO_2	0	0	0	1.123.440	2.443.180
CH_4	0	0	0	52	113
N_2O	0	0	0	37	81
NO_X	0	0	0	6.220	13.526
CO	0	0	0	2.809	6.108
NMVOC	0	0	0	472	1.027
SO_2	0	0	0	357	777
Yakıt Tüketimi (KG/LTO)	0	0	0	357.120	776.640

Tablo 13. Rize-Artvin (RZV) havalimanı 2019-2023 dönemi emisyon oranları (Airbus A 320)

Rize-Artvin Havalimanı (RZV) 2019-2023 Dönemi – Airbus A 320					
Dönem	2019	2020	2021	2022	2023
LTO Sayısı	0	0	0	298	515
CO_2	0	0	0	727.120	1.256.600
CH_4	0	0	0	18	31
N_2O	0	0	0	3	5
NO_X	0	0	0	2.685	4.640
CO	0	0	0	1.845	3.188
NMVOC	0	0	0	152	263
SO_2	0	0	0	229	397
Yakıt Tüketimi (KG/LTO)	0	0	0	229.460	396.550

Tablo 14. Ordu-Giresun (OGU) havalimanı 2019-2023 dönemi emisyon oranları (Boeing 737-800)

Ordu-Giresun Havalimanı (OGU) 2019-2023 Dönemi - Boeing 737-800					
Dönem	2019	2020	2021	2022	2023
LTO Sayısı	3.031	1.700	1.792	1.796	1.840
CO_2	8.426.180	4.726.000	4.981.760	4.992.880	5.115.200
CH_4	212	119	125	126	129
N_2O	303	170	179	180	184
NO_X	37.281	20.910	22.042	22.091	22.632
CO	21.429	12.019	12.669	12.698	13.009
NMVOC	1.970	1.105	1.165	1.167	1.196
SO_2	2.667	1.496	1.577	1.580	1.619
Yakıt Tüketimi (KG/LTO)	2.667.280	1.496.000	1.576.960	1.580.480	1.619.200

Tablo 15. Ordu-Giresun (OGU) havalimanı 2019-2023 dönemi emisyon oranları (Airbus A 321)

Ordu-Giresun Havalimanı (OGU) 2019-2023 Dönemi – Airbus A 321					
Dönem	2019	2020	2021	2022	2023
LTO Sayısı	1.010	340	462	619	778
CO_2	3.050.200	1.026.800	1.395.240	1.869.380	2.349.560
CH_4	141	48	65	87	109
N_2O	101	34	46	62	78
NO_X	16.887	5.685	7.725	10.350	13.008
CO	7.626	2.567	3.488	4.673	5.874
NMVOC	1.283	432	587	786	988
SO_2	970	326	444	594	747
Yakıt Tüketimi (KG/LTO)	969.600	326.400	443.520	594.240	746.880

Tablo 16. Ordu-Giresun (OGU) havalimanı 2019-2023 dönemi emisyon oranları (Airbus A 320)

Ordu-Giresun Havalimanı (OGU) 2019-2023 Dönemi – Airbus A 320					
Dönem	2019	2020	2021	2022	2023
LTO Sayısı	777	340	462	496	495
CO_2	1.895.880	829.600	1.127.280	1.210.240	1.207.800
CH_4	47	20	28	30	30
N_2O	8	3	5	5	5
NO_X	7.001	3.063	4.163	4.469	4.460
CO	4.810	2.105	2.860	3.070	3.064
NMVOC	396	173	236	253	252
SO_2	598	262	356	382	381
Yakıt Tüketimi (KG/LTO)	598.290	261.800	355.740	381.920	381.150

4. Sonuç

Global anlamda kullanılan taşıma araçlarının sebep olduğu emisyon değerlerinin tamamına bakıldığında en başta gelen negatif etkinin karbondioksit (CO_2) kaynaklı olduğu anlaşılabilmektedir. Emisyon değerlerindeki artışın çevreye verdiği zararlı etkiler, döngü içinde insan

sağlığına da negatif anlamda yansımasının ötesinde etkilerinin uzun süreli olmasından dolayı gelecek nesillere de kalıcı hasar bırakacağı unutulmamalıdır. Araştırma tarihine bakıldığında son 50 yıl içinde başlangıçta fazla üzerinde durulmayan çalışmaların geçen süre içinde sayılarının ve önem derecelerinin arttığı gözlemlenebilmektedir. Özellikle son yıllarda emisyon değerlerindeki artışların çevreye verdiği negatif etkilerin incelenmesi, kontrol edilmesi ve emisyon yönetim uygulamaları neticesinde iklim değişikliğinin yönetilmesinde önemli faktör olarak etkilediği anlaşılmaktadır.

Türkiye'nin kuzeydoğusunda bulunan en önemli ve yoğun meydanlardan Trabzon (TZX), Rize-Artvin (RZV) ve Ordu-Giresun (OGU) havalimanlarının son 5 yıllık uçuşları, emisyon değerlerinin hesaplanması amacıyla ele alınmıştır. İlgili meydanlardaki tüm uçuşların ele alınmasının raporlama açısından karışıklık yaratabileceği düşünülerek Türkiye'de son yıllarda en fazla kullanılan üç uçak modelinin ilgili meydanlardaki uçuşlarının incelenmesi çalışmanın kısıtlılığını göstermektedir. En fazla kullanılan uçak tipi belirlenmesinde Türkiye'de sivil havacılık sektöründeki en üst derece sorumlu organ olarak Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) tarafından yıllık şekilde yayınlanan resmi raporlardan faydalanılmıştır. İlgili raporlarda en fazla kullanılan uçak tiplerinden, ilgili meydanlardaki uçuş sayılarına kadar tüm bilgiler doğru ve güncel olarak bulunmaktadır. Türkiye'nin kuzeydoğusundaki havalimanlarının çalışmada hedef seçilme nedeni ise, bölgenin çok etkileyici güzellikteki iklim ve tabiat özelliklerine sahip olmasından dolayıdır. Çalışmada incelenen üç havalimanında Boeing B737-800, Airbus A321 ve Airbus A320 uçaklarının 2019-2023 dönemindeki iniş-kalkış bilgileri, Devlet Hava Meydanları İşletmeleri (DHMİ) raporlarından alınan resmi veriler kullanılarak CO, NO_X ve HC emisyon değerleri ele alınmıştır. NO_X emisyon değerlerinin uçakların kalkış ve tırmanış süreçlerinde, CO emisyon değerlerinin uçakların kalkışlarından önce ve inişlerinden sonra yaptıkları taksi süreçlerinde daha fazla oluştuğu belirtilmektedir (Öztürk ve Taştan, 2024: 28). Ayrıca yine HC emisyon değerlerinin de nispeten hava araçlarının taksi süreçlerinde anlaşılabilir belirginlikte artış gösterdiği belirtilmektedir.

Raporlardan da anlaşılacağı üzere 2019 yılı sonuçları, ilgili tüm emisyon değerleri açısından en üst derecede ölçülmüştür. Fakat daha sonra yaşanılan global Covid-19 pandemisi nedeniyle uçuş sayılarının azalması, tüm emisyon seviyelerinde de belirgin bir düşüş oluşmasına yol açmıştır. NO_X emisyon seviyeleri bakımında Trabzon Havalimanı'nda Boeing 737-800 uçağı 2019 yılında 102.201 ton/y salınımı yaparken 2023 yılında bu rakamın 60.725 ton/y olarak hesaplanmıştır. Aynı uçak tipinde Rize-Artvin (RZV) havalimanında ise NO_X emisyon değeri en yüksek 23.518 ton/y olarak 2023 yılında hesaplanırken Ordu-Giresun (OGU) havalimanında ise 37.281 ton/y olarak 2019 yılı olarak hesaplanmıştır. Airbus A321 tip uçaklara bakıldığında Trabzon (TZX) havalimanında en yüksek NO_X değeri 46.314 ton/y olarak 2019 yılında hesaplanırken Rize-Artvin (RZV) havalimanında ilgili değer 13.526 ton/y olarak 2023 yılında ve 16.887 ton/y olarak da 2019 yılı Ordu-Giresun (OGU) havalimanında hesaplanmıştır. Airbus A320 tipli uçakların uçuşları incelendiğinde Trabzon (TZX) havalimanında NO_X değerlerinin en fazla 19.200 ton/y olarak 2019 yılında, Rize-Artvin (RZV) havalimanında 4.640 ton/y olarak 2023 yılında ve Ordu-Giresun (OGU) havalimanında 7.001 ton/y olarak 2019 yılında oluştuğu hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalar neticesinde farklı tiplerdeki uçak modellerinin ve LTO sayılarının emisyon değerlerini artırma anlamında direkt etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Verilerinden faydalanılan uçak tiplerinin raporlarına (IPCC, 2006) bakıldığında en yüksek emisyon miktarı olan modelin Airbus A321 olduğu görülmektedir. Bu emisyon farklılığındaki esas neden olarak ilgili uçak tipinin diğer uçaklara oranla daha büyük gövdeli oluşu ve daha fazla yolcu ile yük taşıma kapasitesine sahip olması söylenebilir. Model olarak birbirlerine daha yakın olarak gösterilebilecek Boeing B737-800 ile Airbus A320 uçakların emisyon değerleri yakın olmakla birlikte Boeing markasının emisyon değerlerinin yaklaşık yüzde 15-20 oranında daha fazla olduğu raporlardan görülebilmektedir. Bununla beraber uçaklarda kullanılan motor tipleri ve yenilik durumlarının da emisyon oranlarını etkilemesinden dolayı daha detaylı raporların çıkarılması bakımından uçuşlarda kullanılan uçakların motor seri numaralarının bilinmesine de sonuçların daha net çıkartılabilmesi bakımından ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüzde daha yeni nesil hava araçlarının kullanılması, emisyon değerlerinin düşürülmesinde sivil havacılık bağlamında olumlu sonuçlar doğurabilmektedir. Emisyon yönetimi uygulamalarında etkili olunabilmesi bakımından yeni nesil uçakların havayolu şirketleri tarafından tercih edilmesi, kendi yakıt maliyetlerini düşürerek sürdürülebilirlik seviyelerini artırırken emisyon değerlerini de düşürerek çevresel faktörlerin azaltılması ve emisyon yönetim uygulamalarında başarı kazanılmasına yardımcı olmaktadır. Yapılan araştırmalar neticesinde hazırlanan raporlardan özellikle pandemi döneminin emisyon değerlerine olumlu yönde katkı yaptığı anlaşılmaktadır. Boeing tipi uçakların emisyon değerlerinin yüksek oluşunun, sadece model etkeni olarak değil LTO çarpanı bakımından çok fazla kullanılması neticesinde oluştuğu dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla uçak tiplerinin çevresel emisyon yönetimine etkisi en önemli faktör olarak bilinmelidir. Sonraki çalışmalarda emisyon değerlerinin nasıl daha fazla azaltılabileceği ve temiz hava oluşumu için yapılacak farklı yöntemlerin araştırılması önerilebilir. Ayrıca kara taşıtlarında uygulanan elektrikli araç kullanımına yönlendirme ve eski sistem motorların engellenmesi gibi kuralların havacılık sektöründe de uygulanabilirliği incelenmelidir. Raporlarda belirtilen LTO sayılarının emisyon yönetiminde etkisi tartışılmazdır. Hava araçlarının özellikle kalkış ve tırmanış süreçlerinde emisyon değerlerinin çok arttığı

bilindiğinden, özellikle doluluk oranı düşük uçakların kalkışlarında kontrol ve denetim uygulanması, fazla sayıda uçak kullanımı yerine emisyon değerleri düşük ama taşıma kapasitesi yüksek uçakların tercih edilmesi önerilebilir. Çok ayrı bir araştırma alanı olarak bio yakıt gibi farklı yakıtların kullanımının teşvik edilmesi, motor geliştirmelerinin bu tarz yakıt çeşitlerine göre yapılması da önemli görülebilir. Bununla beraber tüketicilerin hava araçlarına binme sürelerinin düşürülmesi, havalimanlarındaki yolcu hizmet sürelerinin kısaltılması, hava araçlarına yüklenen kargo ve yüklerin ağırlıklarının azaltılması, turbofan motorlarının kullanımı yerine turboprop uçakların kullanımının artırılması, yakıt verimliliği ve emisyon değerlerinin düşürülmesi, incelenebilir alanlar olarak önerilmektedir. Ayrıca sadece hava araçlarının değil, ilgili hizmet veren havalimanlarının da yeşil sertifikalı kademelere çıkarılmasının çevresel emisyon yönetimi bakımından çok faydalı olacağı düşünülmektedir. Gelecek yılların yakıt çeşidi olarak gösterilen elektrik kullanımının hava araçlarındaki olası etkileri, geçişin hızlandırılması ve kullanımın yaygınlaştırılması uygulamalarının da emisyon yönetiminde en üst seviye yönetim tarzı olarak araştırılması tavsiye edilmektedir.

Çalışma yalnızca Türkiye'de son yıllarda en fazla kullanılan üç tip uçağın belirlenen havalimanlarındaki ve son beş yıllık süreçteki etkilerine yönelik bilgiler içermektedir. Araştırılan dönemde yaşanılan sosyal, ekonomik ve politik en küçük bir olayın bile raporlara etkilerinin olabileceği unutulmamalıdır. Ayrıca havacılık sektörünün sadece ticari olarak kullanılmadığı, eğitim ve askeri kullanımların da oran olarak tam bilinmese bile çok yüksek olduğu tahmin edilmektedir. Emisyon yönetimi uygulamalarında asıl önemli nokta, hesaplama neticelerinin uygulanabilirliğidir. Zira uygulamanın kullanılması haricinde zorunluluk olarak kuralların getirilmesi, uygulamaların yapılmasının kontrolü ve ileriye dönük planlamaların yapılmasına da ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmada faydalanılan IPCC verilerine dayanan hesaplama yöntemleri haricinde daha güncel ve detaylı yöntemlerin geliştirilmesi, bu yöntemler neticesinde elde edilen raporlara göre yaptırımların eksiksiz biçimde uygulanması, emisyon yönetiminde asıl etkiyi yükseltecek faktörler olabilecektir. Ayrıca sadece havacılık sektörü bağlamında değil, genel taşımacılık sektörü olarak emisyon azaltımına ve yönetilmesine dair önlemlerin hızlı biçimde hayata geçirilmesi gerekmektedir. Zira global CO_2 emisyonlarının insan kaynaklı toplamlarının yaklaşık %2,1'lik oranı, genel havacılık sektörü sebebiyle oluşmaktadır. ATAG (2021) raporuna göre havayolu ulaşımı yani ticari havacılığın tüm ulaşım alternatifleri içindeki CO_2 emisyon payı % 12 olarak belirtilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre havalimanlarına ait emisyon hesaplamalarının ve emisyon yönetimlerinin birçok faktöre göre değişebileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca kullanılan hava araçlarının çokluğu ve ileriye yönelik uçuş sayılarının artacağının düşünülmesi, havacılık sektörünün emisyon yönetimi uygulamaları bakımından ne derece önemli rol oynadığını da ortaya koymaktadır.

Çalışma konusuyla ilgili literatür incelendiğinde amaç olarak yakın ama alt başlık ve genişlik bakımından fazla çalışma olmadığı görülmektedir. Atabey (2013) tarafından yapılan karbon ayak izi araştırmasında Diyarbakır il sınırları içindeki sera gazı hesaplaması yapılmıştır. İlgili çalışma daha çok kara taşıtları üzerine yapılmış ve sonuçlarında daha çevre dostu kaynakların kullanılması ve kullanım oranlarının düşürülmesi öneri olarak sunulmuştur. Öztürk ve Taştan (2024) tarafından yapılan çalışmada ise Muğla ili Dalaman ve Bodrum Havalimanları özelinde belli uçak tipleri ile ilgili bir araştırmalar yapılmıştır. İlgili çalışmada emisyon oranlarının hesaplanması üzerinde durularak uçaklardan meydana gelen emisyon değerlerinin özellikle uçuştan önceki taksi sırasında fazla oluşu üzerinde durulmuştur. Uçuşların genel sonuçlarından daha çok kalkış öncesi uçakların pist başına geçişleri ve inişleri sonrasındaki park pozisyonlarına geçişlerindeki emisyon değerleri dikkate alınmıştır. Sonuçta havayolu işletmelerine uçaklarının havalimanı manevralarında daha kısa taksi yaptırmaları önerilerinde bulunulmuştur. Bir diğer çalışmada Taşdemir ve Aydın (2021), havacılıkta karbon azaltım uygulamaları ve şirket stratejileri konulu çalışmayı yayınlamışlardır. Sonuç kısmında havayolu şirketlerinin daha fazla bioyakıt kullanmaları gerektiği, bunun ileriki dönemlerde yasal zorunluluk haline getirilebileceği ve yapılmakta olan geliştirmelerin ileride farklı ve olumlu sonuçlarının olabileceğinden bahsetmektedirler. Belirtilen çalışmaların bizim çalışmamız ile benzeyen yönleri tamamen sürdürülebilir odaklı olmaları ve emisyon değerlerine atıfta bulunmalarıdır. Sonuçları bakımından da çalışmamıza paralel emisyonların düşürülmesi gerektiği ve yeni teknolojik gelişimlerinin ileride bu konuda olumlu sonuçlar doğuracağı anlatılmaktadır. Çalışmamızın en büyük farkı daha yoğun kullanım olan üç farklı havalimanında ve 5 yıllık geniş bir süreyi kapsıyor olmasıdır. Ayrıca araştırmada en fazla kullanılan 3 uçak tipinin alınması, gerçeğe uygun neticelerin alınması bakımından önem arz etmektedir.

Çalışmanın bazı kısıtları bulunmaktadır. En başta da belirtildiği gibi Türkiye'deki toplamda DHMİ (2024: 148) raporlarına göre 57, son açılan Çukurova Havalimanı (COV) dâhil 58 havalimanından yalnızca ülkenin en kuzey doğusunda bulunan üç tanesinin verileri alınmıştır. Bu sebeple daha yoğun kullanılan havalimanlarının seçilerek hesaplamaların yapılması, alınacak neticelerin büyüklüğü ile durumun vahametinin anlaşılması açısından önemli görülmektedir. Diğer kısıt da hem dünya genelinde hem de Türkiye özelinde en fazla kullanılan uçak tiplerinden ilk üç tanesinin (Boeing 737-800, Airbus A321 ve Airbus A320) uçuş verileri ve ortalamalarının alınarak analiz edilmesidir. Dolayısıyla daha geniş verilere ulaşılması amacıyla diğer uçak tiplerinin de çalışmalara dâhil edilmesi önerilmektedir. Ayrıca yurtdışındaki diğer havalimanları ile kıyaslamalı çalışmalar yapılmasının,

ülkeler arasındaki seviyenin anlaşılması bakımından etkili sonuçlar verebileceği düşünülmektedir. Hem havayolu işletmelerinin hem de havalimanları yönetimlerinin çevre dostu emisyon yönetimi uygulamalarını destekleyerek azaltım konusunda çabalarını artırmaları çok önemlidir. Güncel ve sürekli emisyon yönetimi hesaplamaları ile yeni yöntemlerin geliştirilmesi ise hem gerçek zamanlı verilerin kullanılması, hem de uygulanan kuralların neticelerinin takibinde etkili ve doğru yönlendirme sağlayabilecektir. Dolayısıyla gerçek ve güncel verilere dayanarak sürekli yeni stratejilerin geliştirilmesi ve bunun tüm paydaşlara benimsetilmesinin, emisyon yönetimi uygulamalarında negatif çevresel etkilerin daha düşük seviyeye indirilmesinde en etkili yol olabileceği düşünülmektedir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	F.K.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Çalışmada herhangi bir potansiyel çıkar çatışması söz konusu değildir. Ayrıca hiçbir kurum veya kişilerle çıkar ilişkisinin de bulunmadığını beyan ederim.

Etik Onay Beyanı

"Sivil Havacılık Sektöründe Emisyon Hesaplama Yöntem ve Yönetimi: Trabzon, Rize-Artvin ve Ordu-Giresun Havalimanları Örneği" başlıklı çalışmanın yazım sürecinde bilimsel kurallara, etik ve alıntı kurallarına uyulmuş; toplanan veriler üzerinde herhangi bir tahrifat yapılmamış ve bu çalışma herhangi başka bir akademik yayın ortamına değerlendirme için gönderilmemiştir. Ayrıca bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

Air Transport Action Group (ATAG). 2021. CORSIA Explained: Aviation: Benefits Beyond Borders. URL: https://aviationbenefits.org/environmentalefficien¬cy/climate-action/offsetting-emissions-corsia/corsia/corsia-explained/ (accessed date: August 10, 2024).

Akca M. 2020. COVID-19'un havacilik sektörüne etkisi. Avrasya Sosyal Ekon Araş Derg, 7(4): 45-64.

Ashworth K, Bucci S, Gallimore PJ, Lee J, Nelson BS, Sanchez-Marroquín A, McQuaid JB. 2020. Megacity and local contributions to regional air pollution: an aircraft case study over London. Atmos Chem Phys, 20(12): 7193-7216.

Atabey T. 2013. Karbon ayak izinin hesaplanması: Diyarbakır örneği. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye ss: 65.

Babaoğlu N, Özgünoğlu K. 2017. Kahramanmaraş havalimanı için uçaklardan kaynaklanan emisyonların belirlenmesi. KSÜ Müh Bilim Derg, 20(3): 24-30.

Bajgai DP, Shrestha KL. 2023. Evaluation of aircraft emission at Tribhuvan international airport and its contribution to air quality in Kathmandu, Nepal. Atmos Environ X, 17: 100204.

Berntsen T, Gauss M, Grewe V, Hauglustaine D, Isaksen I, Mancini E, Sausen R. 2003. Sources of NOx at cruise altitudes, implications for predictions of ozone and methane perturbations due to nox emissions from aircraft. Aircraft, Berlin, Germany, pp: 125.

Cao F, Tang TQ, Gao Y, You F, Zhang J. 2023. Calculation and analysis of new taxiing methods on aircraft fuel consumption and pollutant emissions. Energy, 277: 127618.

Carslaw DC, Ropkins K, Laxen D, Moorcroft S, Marner B, Williams ML. 2008. Near-field commercial aircraft contribution to nitrogen oxides by engine, aircraft type, and airline by individual plume sampling. Environ Sci Technol, 42(6): 1871-1876.

DHMİ. 2020. Devlet hava meydanları işletmesi genel müdürlüğü, 2019 faaliyet raporu. Ankara, Türkiye, ss: 224.

DHMİ. 2021. Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü. 2020 Faaliyet Raporu. Ankara, Türkiye, ss: 247.

DHMİ. 2022. Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü. 2021 Faaliyet Raporu. Ankara, Türkiye, ss: 223.

DHMİ. 2023. Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü. 2022 Faaliyet Raporu. Ankara, Türkiye, ss: 226.

DHMİ. 2024. Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü. 2023 Faaliyet Raporu. Ankara, Türkiye, ss: 228.

Ekici S, Şöhret Y. 2020. Environmental impact and cost assessment of commercial flight induced exhaust emissions at Isparta Süleyman Demirel Airport. Müh Bilim Tasarım Derg, 8(2): 597-604.

Elbir T. 2008. Estimation of engine emissions from commercial aircraft at a midsized Turkish airport. J Environ Eng, 134(3): 210-215.

Environmental Protection Agency (EPA). 1999. Evaluation of air pollutant emissions from subsonic commercial jet aircraft, Final Report, Report No. EPA A420-R-99-013, Engine Programs and Compliance Division, US Environmental Protection Agency, Ann Arbour, Michigan, USA, pp: 25.

Fleuti E, Polymeris J. 2004. Aircraft NOx-emissions within the operational LTO cycle. Unique (Flughafen Zurich AG), Zurich, Switzerland, pp: 32.

Genç R, Behçet R. 2022. Malatya Erhaç Havalimanını Kullanan Uçakların Çevresel Etkileri. J Math Eng Nat Sci, 6(22): 437-449.

ICAO I. 1995. Engine exhaust emissions data bank. ICAO Committee on Aviation Environmental Protection Working Group, 3: 10-13.

ICAO. 2017. International Standards And Recommended

Practices- Annex 16 To The Convention On International Civil Aviation: Environmental Protection II- Aircraft Engine Emissions (Fourth Ed.), QC, Montreal, Canada 552.

ICAO. 2021. Future of Aviation. URL: https://www.icao.int/Meetings/FutureOfAviation/Pages/default.aspx (accessed date: August 12, 2024).

İlbaş M, Yılmaz İ. 2012. Experimental analysis of the effects of hydrogen addition on methane combustion. Int J Energy Res, 36(5): 643-647.

IPCC, 1991. IPCC/UNEP/OECD/IEA. 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume I: Reporting Instructions, Chapter 1: 1-4. Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Programme, Organization for Economic Co-Operation and Development, International Energy Agency, Paris, France, pp: 14.

IPCC. 1997a. IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume II: Workbook, Chapter 1: 3-23. Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Programme, Organization for Economic Co-Operation and Development, International Energy Agency, Paris, France, pp: 16.

IPCC. 1997b. IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume III: Reference Manual, Chapter 1: 4-44, 62-98. Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Programme, Organization for Economic Co-Operation and Development, International Energy Agency, Paris, France, pp: 24.

IPCC. 2006. Energy. In 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/ (accessed date: August 12, 2024).

Kaya AG, Aydin U. 2022. Is there any convergence in the CO2 emission efficiency of airlines? Environ Sci Pollut Res, 29(12): 17811-17820.

Kesgin U. 2006. Aircraft emissions at Turkish airports. Energy, 31(2-3): 372-384.

Kumaş K, İnan O, Akyüz AÖ, Güngör A. 2019. Muğla Dalaman Havalimanı Uçaklardan Kaynaklanan Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi. Acad Platform J Eng Sci, 7(2): 291-297.

Kuzu SL. 2018. Estimation and dispersion modeling of landing and take-off (LTO) cycle emissions from Atatürk International Airport. Air Qual Atmos Health, 11: 153-161.

Linz M. 2012. Scenarios for the aviation industry: A Delphi-based analysis for 2025. J Air Transp Manag, 22: 28-35.

Lund MT, Aamaas B, Berntsen T, Bock L, Burkhardt U, Fuglestvedt JS, Shine KP. 2017. Emission metrics for quantifying regional climate impacts of aviation. Earth Syst Dynam, 8(3): 547-563.

Nikoleris T, Gupta G, Kistler M. 2011. Detailed estimation of fuel consumption and emissions during aircraft taxi operations at Dallas/Fort Worth International Airport. Transp Res D Transp Environ, 16(4): 302-308.

Öz E, Erçoşkun ÖY. 2022. Covid-19 Pandemisinin Esenboğa Havalimanı hava trafiğine ve uçak emisyonlarına etkisi. Akıllı Ulaşım Sist Uygulama Derg, 5(1): 45-59.

Öztürk O. 2011. Kayseri Erkilet havalimanındaki uçak emisyonlarının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye ss: 42.

Öztürk O, Taştan M. 2024. 2015-2021 Yılları Arasında Muğla İlinde LTO Döngüsü Esnasında B737-800 ve A320 Tip Uçaklardan Kaynaklanan Emisyonun Gerçek Zamanlı Hesaplanması. Erciyes Üniv Fen Bilim Enst Fen Bilim Derg, 40(1): 20-33.

Pecorari E, Mantovani A, Franceschini C, Bassano D, Palmeri L, Rampazzo G. 2016. Analysis of the effects of meteorology on aircraft exhaust dispersion and deposition using a Lagrangian particle model. Sci Total Environ, 541: 839-856.

Schäfer K, Jahn C, Sturm P, Lechner B, Bacher M. 2003. Aircraft emission measurements by remote sensing methodologies at airports. Atmos Environ, 37(37): 5261-5271.

Schumann U. 2000. Effects of aircraft emissions on ozone, cirrus clouds, and global climate. Air Space Eur, 2(3): 29-33.

Schürmann G, Schäfer K, Jahn C, Hoffmann H, Bauerfeind M, Fleuti E, Rappenglück B. 2007. The impact of NOx, CO and VOC emissions on the air quality of Zurich airport. Atmos Environ, 41(1): 103-118.

Spicer CW, Holdren MW, Smith DL, Miller SE, Smith RN, Kuhlman MR, Hughes DP. 1987. Aircraft emissions characterization: TF41-A2, TF30-P103, and TF30-P109. ESL-TR-87-27. BATTELLE COLUMBUS DIV OH, Final report, Florida, USA, pp: 75.

Spicer CW, Holdren MW, Cowen KA, Joseph DW, Satola J, Goodwin B, Hashmonay R. 2009. Rapid measurement of emissions from military aircraft turbine engines by downstream extractive sampling of aircraft on the ground: Results for C-130 and F-15 aircraft. Atmos Environ, 43(16): 2612-2622.

Taşdemir M, Aydın E. 2021. Havacılıkta Karbon Azaltım Uygulamaları ve Şirket Stratejileri. In International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies, 22-25 February, Bandırma, Türkiye, ss: 22-25.

Ünal İ, Türkoğlu F, Doğan B. 2014. Nevşehir Kapadokya Havalimanının Emisyon ve Gürültü Açısından Değerlendirilmesi. Engin Machin Mag, 2014: 654.

Yavaş V, Dedeoğlu AÖ. 2021. Hava Taşımacılığında Değişen İş Modelleri. Akıllı Ulaşım Sist Uygulama Derg, 4(2): 120-133.

Wuebbles D, Gupta M, Ko M. 2007. Evaluating the impacts of aviation on climate change. Eos Trans Am Geophys Union, 88(14): 157-160.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1627614

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 814-823 / May 2025

THERMODYNAMIC AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE ANALYSIS OF THE MARIB INTEGRATED POWER AND COOLING CYCLE

Abdulrazzak AKROOT[1]*

[1]*Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 78050 Karabük, Türkiye*

Abstract: Meeting energy demands while ensuring sustainability is a critical challenge in underdeveloped regions like Yemen. The Marib Integrated Power and Cooling Cycle (MIPCC) is proposed as an innovative solution to enhance power generation efficiency and reduce environmental impact by utilizing waste heat from the Marib gas turbine plant. This study evaluates the thermodynamic, economic, and environmental performance of the MIPCC system, which integrates the Brayton, Rankine, and absorption refrigeration cycles for simultaneous power generation and cooling. The results indicate that the MIPCC system significantly improves performance, achieving a net power output of 226 MW with energy and exergy efficiencies of 47.91% and 46.26%, respectively. The system reduces CO_2 emissions to 403.5 kg/MWh and minimizes the cost of electricity to 70.55 $/MWh, demonstrating both environmental and economic viability. Additionally, it provides a cooling capacity of 53.5 MW, making it ideal for hot climates. The MIPCC offers a transformative energy solution by maximizing efficiency, lowering emissions, and reducing dependency on fossil fuels. Its application in energy-deprived areas can enhance energy security and economic growth, making it a scalable model for sustainable power generation in regions facing infrastructure and energy challenges.

Keywords: Marib power plant, Hybrid energy systems, Thermodynamic analysis, Heat recovery technology

***Corresponding author:** Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 78050 Karabük, Türkiye
E mail: abdulrazzakakroot@karabuk.edu.tr (A. AKROOT)
Abdulrazzak AKROOT https://orcid.org/0000-0002-1561-7260

Received: January 27, 2025
Accepted: April 05, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Akroot A. 2025. Thermodynamic and environmental performance analysis of the marib integrated power and cooling cycle. BSJ Eng Sci, 8(3): 814-823.

1. Introduction

Humanity is being dramatically affected by climate change, mainly caused by the consumption of fossil fuels. As per the International Energy Agency (IEA), the world's primary energy supply has increased at an average rate of 2.5% per year between 1971 and 2017, from 5519 Mtoe in 1971 to 13,972 Mtoe in 2017. According to the IEA, in 2024 alone, there were 37.34 Gt of carbon dioxide emissions. At the same time, demand for cooling has risen sharply on account of climate change and demographic trends. About 20 percent of the world's electricity is consumed for air conditioning and cooling (He et al., 2022; Wang et al., 2009).

A large amount of research has been done to develop novel thermodynamic cycles to combat the demand for decreasing fossil fuel consumption and lowering the production of greenhouse gas emissions. These advanced cycles aim to provide power and cooling simultaneously with greater efficiency than conventional, separate cycles (Kumar et al., 2010). Additionally, several of these conceptual systems utilize a low- to medium-temperature heat source, such as industrial waste heat or renewable energy, to allow for high sustainability and energy efficiency. Rostamzadeh et al. (2018) proposed a new combined cooling and power cycle that interconnected the Kalina cycle with the ejector refrigeration cycle, also obtaining a thermal efficiency of 33.65% and cooling capacity of 160.6 kW, improving exergy efficiency and reducing irreversibility through parametric optimization. Yin et al. (2018) proposed a Goswami cycle-ejector refrigeration cycle combined cooling and power system with a thermal efficiency of 17.49% and exergy efficiency of 26.15%, whose performance was affected by absorber temperature, boiler temperature, and number of pressure stages. Parikhani et al. (2020) also designed a modified ammonia-water CCHP system based on the Kalina cycle. They obtained the energy and exergy efficiencies of 49.83% and 27.68%, respectively, and conducted a sensitivity analysis to emphasize crucial parameters (like evaporation temperature and ammonia concentration) for better performance and lower cost. Wang et al. (2019) proposed a solar thermal biomass gasification-based CCHP system achieving energy and exergy efficiencies of 56% and 28%, respectively, with a solar-to-biogas energy ratio of 0.19, showing its capability to improve biomass energy utilization significantly. Talal and Akroot (2024) evaluated a solar and Brayton cycle-based polygeneration system, achieving energy and exergy efficiencies of 51.15% and 49.4% for ISCC-ARC and 50.89% and 49.14% for ISCC, with specific costs ranging from $69.09/MWh to

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

$79.05/MWh depending on configuration and season. Aghaziarati and Aghdam (2021) introduced a solar organic Rankine cycle integrated with cascade refrigeration for hospitals, achieving energy and exergy efficiencies of 89.39% and 8.70%, respectively, with solar collectors identified as the primary source of irreversibility and cyclohexane and octane providing optimal efficiency. Wu et al. (2019) evaluated a novel CCHP system combining solar thermal and organic Rankine cycle subsystems, achieving a primary energy ratio of 60.2% and generating 108 kW, with 12.4% lower natural gas consumption compared to conventional systems. Wu et al. (2020) proposed a novel CCP system combining a regenerative sCO_2 Brayton cycle and ammonia-water absorption refrigeration, achieving exergy efficiency improvements of 2.29-2.54% and thermal efficiency gains of 8.16-18.93%. Nami et al. (2019) evaluated a waste-driven combined heat and power system integrated with a large-scale absorption chiller, achieving a 12% improvement in thermal efficiency, a 28.58% exergy efficiency, and an emission reduction of 445.935 kg-CO_2/GJ. Salimi et al. (2022) highlighted the potential of combined cooling, heating, and power (CCHP) systems in reducing energy consumption and environmental impacts, particularly in sectors like hospitals, airports, and hydrogen production. Liao et al. (2019) proposed a novel CCHP-ORC system for recovering waste heat in coal-fired plants, achieving optimized exergy production rates using R1234ze(E) and heptane/R601a as working fluids, with parametric analysis showing a 19.4% and 18.3% decline in thermal efficiency when condenser temperature rises from 25°C to 40°C. Aghaei and Saray (2021) optimized a CCHP-Boiler system driven by a gas turbine and auxiliary boiler for a dairy factory, finding that higher air compressor pressure ratios (14.79) improve performance. At the same time, optimization reduces the need for an air pre-heater (APH), making it unnecessary. Ghorbani et al. (2023) presented a geothermal-based CCHP cogeneration system integrating Kalina, ejector refrigeration, and organic Rankine cycles, achieving an exergy efficiency of 26.55%, thermal efficiency of 23.04%, and net output power of 226 kW under optimal conditions. Chu et al. (2023) analyzed a micro-gas turbine CCHP system with an absorption chiller, achieving exergy efficiencies of 19.96% in summer and 25.13% in winter.

Despite extensive research on combined cycle systems, few studies have focused on solutions tailored for regions with energy poverty and outdated infrastructure. The Marib Integrated Power and Cooling Cycle (MIPCC) offers an innovative approach by integrating Brayton, Rankine, and absorption refrigeration cycles to enhance power and cooling efficiency under real-world constraints. This study bridges a critical gap in energy sustainability by demonstrating the economic and environmental feasibility of this hybrid system in Yemen's Marib power plant. Addressing Yemen's energy challenges, the research examines Marib's electricity shortages, exacerbated by aging infrastructure and dependence on costly diesel generators, which hinder economic growth and daily life. The MIPCC presents a novel solution by utilizing waste heat to generate electricity, cooling, and heating, improving efficiency while lowering costs and CO_2 emissions. This approach transitions from conventional power generation to a more sustainable, locally adaptive model that reduces reliance on unstable energy sources. The findings provide actionable insights for addressing global energy challenges, promoting cleaner, more efficient power solutions.

2. Materials and Methods

2.1. Model Description

MIPCC is an innovative energy system which operates to improve the efficiency of power generation and effective cooling in Marib located in Yemen, as seen in Figure 1. This new cycle integrates three thermodynamic processes into one: the Brayton cycle, which is the primary cycle by which power is generated and, in this case, through gas turbines; the Rankine cycle, which accounts for further power recovery by additional steam at the expense of exhaust gases through steam turbines; and the absorption cooling cycle, which acts towards air pre-cooling (before entering the gas turbines) and the consequent help to satisfy the cooling needs. By effectively using exhaust heat and integrating these cycles, the MIPCC recovers energy economically, minimizing environmental burden and addressing sustainable energy requirements for Marib's inhospitable climate.

In the Brayton cycle, the air is compressed in the axial compressors, wherein the air is routed into the combustion chamber. Fuel is injected and mixed with air, where it burns to create high-temperature and high-pressure gases. The exhaust gases drive the gas turbines and generate mechanical power because of the heat energy of the gases. Basically, this cycle shows its primary design over power generation in a more effective way, with the use of the exhaust gases that are of significant thermal energy, which can be used in heat recovery steam generation to increase the total energy efficiency.

The Rankine Cycle absorbs the exhaust gases from the Brayton Cycle and moves them to a heat recovery steam generator (HRSG) to utilize their heat to create steam. The steam expands across three steam turbines: the High-Pressure Steam Turbine (HPST), Intermediate-Pressure Steam Turbine (IPST), and Low-Pressure Steam Turbine (LPST), which is used to drive a second generator, producing even more electricity. Once expanded, the steam is condensed as water in a condenser and pumped back into the HRSG using two open feedwater heaters (OFWH1 and OFWH2). This setup makes use of the Rankine cycle to recover energy from the exhaust gases produced by the Brayton cycle to get better power generation efficiency ultimately.

Exhaust gases from HRSG (stream 6) are used by the generator of an absorption cooling cycle that runs on a lithium bromide-water (LiBr-H2O) solution. Those

components include an absorber, solution heat exchanger (SHEX), pump (P), evaporator, and condenser. This cycle is intended primarily for pre-cooling of the air entering the Brayton cycle (stream 10a), while it also adds some additional cooling capabilities.

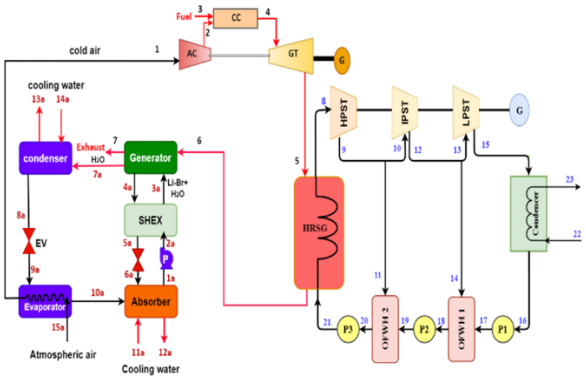


Figure 1. Marib integrated power and cooling cycle (MIPCC).

The Engineering Equation Solver (EES) program is used to calculate thermodynamic properties at each state point and simulate the system's performance, ensuring accurate analysis and optimization. The simulation mode's input parameters are presented in Table 1, and the analysis of the MIPCC system is conducted based on the following simplifying assumptions:

•All processes are considered to operate under steady-state conditions.
•Both air and flue gases are treated as ideal gas mixtures.
•Natural gas is used as the fuel in the combustion chamber.
•A constant isentropic efficiency is assumed for the compressors and the turbines, and pumps.
•The generator and evaporator outlets are assumed to produce saturated vapor water.
•The condenser outlet is assumed to yield saturated liquid.
•Pressure losses in the pipes and heat exchangers are considered negligible.
•All components are assumed to be adiabatic.
•The lithium bromide (LiBr) solutions in the generator and absorber are assumed to be in thermodynamic equilibrium with their corresponding temperatures and pressures.

While this study offers valuable insights, it has several limitations. Theoretical assumptions, including ideal gas behavior and adiabatic components, may not accurately reflect real-world inefficiencies. Methodologically, the findings rely on simulation data rather than experimental validation, underscoring the need for real-world testing and pilot studies. Furthermore, the economic feasibility assessment is based on estimated cost parameters, which are subject to fluctuations due to market dynamics, geopolitical factors, and infrastructure challenges, requiring further validation for practical implementation

Table 1. Input parameters for the simulation

Parameter	Value
Gas Turbine Cycle	
Compressor pressure ratio	11
Ambient pressure	101.3 bar
Ambient temperature	26 °C
Air mass flow rate	500 kg/s
Lower heating value of fuel	50056 kJ/kg
η_{GT}	90%
η_{AC}	86%
Rankine cycle	
HPST inlet pressure	100 bar
IPST inlet pressure	40 bar
LPST inlet pressure	10 bar
Condenser Temperature	40 °C
η_{ST}	90%
η_{Pumps}	85%
Absorption Refrigeration Cycle	
Outlet temperature of Condenser	39 °C
Evaporator temperature	5 °C
Generator temperature	88°C
Absorber temperature	37°C
Concentration of weak solution	53%
Concentration of strong solution	62%

2.2. Thermodynamic Analysis

The mass, energy, and exergy balance equations for each system component are expressed as follows (equations 1-3) (Noroozian et al., 2017):

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum \dot{m}_{in} h_{\text{in}} = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (2)$$

$$\sum (\dot{m}ex)_{in} + \dot{E}x_{Q} = \sum (\dot{m}ex)_{out} + \dot{E}x_{W} + \dot{E}x_{\text{des}} \quad (3)$$

The subscripts "i" and "e" indicate the inlet and exit of the control volume, respectively. $\dot{E}x_{\text{des}}$ represents the exergy destruction within each component, while "ex" corresponds to the exergy of each stream. $\dot{E}x_{W}$ and $\dot{E}x_{Q}$ denote the exergies associated with power and heat transfer, respectively, and are determined using the following equations 4 and 5 (El-Emam and Dincer, 2013):

$$\dot{E}x_{Q} = \dot{Q}\left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \quad (4)$$

$$\dot{E}x_{W} = \dot{W} \quad (5)$$

The energy performance denoted as η_{th}, can be estimated using the following equations 6 and 7:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{GT} - \dot{W}_{AC} + \dot{W}_{HPST} + \dot{W}_{LPST} + \dot{W}_{Pumps} \quad (6)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{GT} - \dot{W}_{AC} + \dot{W}_{HPST} + \dot{W}_{LPST} + \dot{W}_{Pumps}}{\dot{Q}_{in}} \quad (7)$$

The heat input to the cycle ($\dot{Q}_{in}$) is determined using the following equation 8:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{fuel} . LHV . \eta_{CC} \quad (8)$$

Furthermore, the exergy efficiency (η_{ex}) can be calculated using the given formula (equation 9), reflecting the system's effectiveness in utilizing energy quality:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{GT} - \dot{W}_{AC} + \dot{W}_{HPST} + \dot{W}_{LPST} + \dot{W}_{ORT} + \dot{W}_{Pumps}}{\dot{E}_3 + \dot{E}_{Q_{solar}}} \quad (9)$$

Here, $\dot{E}_3$ denotes the exergy of the fuel supplied to the cycle's combustion chamber (CC). The rate of cooling load is determined using the following equation 10:

$$\dot{Q}_{cooling} = \dot{Q}_{Evap} - \dot{m}_1(h_{15a} - h_1) \quad (10)$$

2.3. Exergoeconomic and Environmental Analysis

The exergy costing process involves formulating cost balance equation 11 separately for each component of the system, as outlined below (Akroot and Al Shammre, 2024):

$$\sum(c_e \dot{E}x_e)_k + c_{w,k}\dot{W}_k = c_{Q,k}\dot{E}x_{Q,k} + \sum(c_i \dot{E}x_i)_k + \dot{Z}_k \quad (11)$$

From the above equation, it can be concluded that the cost rates of the exergy streams leaving each component are equal to the cost rates of the entering exergy streams, combined with the investment cost rate needed for the component's operation. In equation 11, "c" represents the unit cost of each exergy stream, while the capital investment cost rate, Z˙_k, is calculated using equation 12 (Yang et al., 2024):

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k \, CRF \, \varphi}{N} \quad (12)$$

In this context, Z_k represents the purchase cost of the k-th component, while ϕ signifies the maintenance factor. N corresponds to the system's annual operating hours, and the Capital Recovery Factor (CRF) is calculated using equation 13 (Nourpour et al., 2023):

$$C R F = \frac{(i(1+i)^n)}{((1+i)^n - 1)} \quad (13)$$

The system's interest rate is set at i=10%, with an operational lifespan of n=20 years. Furthermore, the maintenance factor (ϕ) is assumed to be 1.06, and the annual operating hours (N) are specified as 2000 hours. Finally, the CO_2 emission rate (ε_{CO2}) is calculated using the equation 14 provided below (Alfaris et al., 2024):

$$\varepsilon_{CO2} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\dot{W}_{net}} \times 100 \quad (14)$$

3. Results and Discussion

Table 2 validates the results of the present study by comparing them with reference data for gas turbine and absorption refrigeration cycles, along with calculated errors. The table shows minimal errors across all parameters, indicating that the present study's results are highly consistent with reference data. The highest error is 0.92% for the exhaust temperature.

Table 3 highlights the key performance metrics of the MIPCC system, offering insights into its power generation, efficiency, and cooling capabilities. The results reveal that the system delivers a net power output of 226 MW, showcasing its ability to generate substantial power even after accounting for energy consumption by auxiliary components like pumps and compressors. With an energy efficiency of 47.91%, nearly half of the input energy is effectively converted into useful work, while the exergy efficiency of 46.26% reflects the system's effectiveness in minimizing energy losses and utilizing available resources. Additionally, the system provides a cooling capacity of 53.5 MW, underscoring its capability to deliver both power and cooling services. The coefficient of performance (COP) is 0.808, indicating how efficiently the system uses energy to produce cooling relative to its input power. The findings highlight the system's ability to balance affordability and environmental impact effectively. With a cost of 70.55 $/MWh and CO_2 emissions of 403.5 kg/MWh, the system proves to be both cost-efficient and environmentally sustainable.

Table 2. Validation of Present Study Results with Reference Data for Gas Turbine and Absorption Refrigeration Cycle(Al-Attab, 2014; Jain et al., 2015)

Parameter	Present study	Reference	*Error (%)*
	Gas Turbine Cycle(Al-Attab, 2014)		
Power output (MW)	163.1	163	0.06
Exhaust temperature	546	541	0.92
Exhaust mass flow	509.4	509	0.08
Efficiency	34.9	34.7	0.58
	Absorption Refrigeration Cycle (Jain et al., 2015)		
Heat load in evaporator (kW)	62.15	61.63	0.84
Heat load in generator(kW)	76.78	76.98	0.26
Heat load in absorber (kW)	73.44	73.32	0.16
COP	0.752	0.749	0.4

Table 3. Performance Parameters of the MIPCC System

Parameter	Unit	Value
Power supplied to AC	MW	163.9
Power output of GTs	MW	320.7
Power output of HPST	MW	16.481
Power output of IPST	MW	17.795
Power output of LPST	MW	35.812
Power supplied to P1	kW	65.5
Power supplied to P2,	kW	227.6
Power supplied to P3	kW	535.7
Net power	MW	226
Overall energy efficiency	%	47.91
Overall exergy efficiency	%	46.26
Cooling capacity	MW	53.5
COP	-	0.808
CO2 emission	kg/MWh	403.5
Cost of electricity	$/MWh	70.55

Figure 2 considers the interplay of various system parameters for the MIPCC system as the pressure ratio (PR) increases, focusing on how these changes affect the work outputs and cooling load. The findings present that the W_{BC} initially increases with rising PR, peaking around PR = 9-10 before starting to decline. At PR = 6, W_{BC} is 146.4 MW, increases to 156.8 MW at PR = 10, and then drops to 148.4 MW at PR = 18. The decline in higher PR values is attributed to the increased power consumption of the air compressor, which outweighs the gains in turbine work output. The W_{RC} decreases steadily as the PR increases, dropping from 98.35 MW at PR = 6 to 50.37 MW at PR = 18. This decline is directly linked to the reduction in the turbine exhaust temperature (T_5), which feeds the HRSG. The lower T_5 results in reduced heat transfer to the HRSG, thereby limiting the work output of the Rankine cycle. The W_{net} is the sum of the Brayton and Rankine cycles, reflecting the combined contributions of both cycles. As the PR increases, W_{net} decreases from 244.8 MW at PR = 6 to 198.7 MW at PR = 18. This reduction is primarily caused by two factors: the increased power consumption of the air compressor at higher PR values, which reduces W_{BC}, and the steady decline in W_{RC} due to lower thermal energy entering the HRSG, driven by a decrease in turbine exhaust temperature. The cooling load ($Q_{cooling}$) decreases steadily as the PR increases, dropping from 57.46 MW at PR = 6 to 50.2 MW at PR = 18. This reduction is directly linked to the decline in T_6. As T_6 decreases, the generator's heat energy is reduced, lowering the cooling load, as less energy needs to be dissipated. The rate of decrease is more gradual at lower PR values (PR = 6-10) but becomes more pronounced at higher PR values (PR = 11-18), indicating a stronger influence of reduced thermal input at elevated PR levels. This aligns with the reduction in turbine exhaust temperature (T_5).

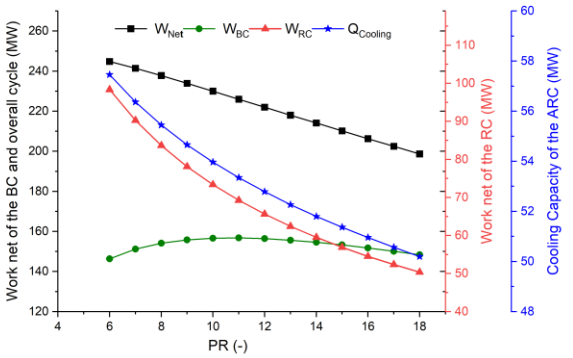


Figure 2. Variation of work net and Cooling Load with Pressure Ratio (PR) in the MIPCC System.

Figure 3 provides insights into the performance of the MIPCC system, focusing on key parameters such as CO_2 emissions (ε_{system} and ε_{BC}), efficiencies (η_I and η_{II}), and the specific cost of energy ($C_{electricity}$). The results indicate that the reduction in CO_2 emissions in the MIPCC system is primarily driven by two factors: the contribution of the Rankine cycle, which recovers waste heat from the Brayton cycle's exhaust, and the cooling of ambient air before it enters the Brayton cycle. This pre-cooling process enhances Brayton cycle efficiency, reduces fuel consumption, and lowers emissions. CO_2 emissions for the MIPCC system decrease steadily with increasing PR, from 419.6 kg CO_2/MWh at PR = 6 to 402.5 kg CO_2/MWh at PR = 18. Compared to the standalone Brayton cycle, the MIPCC system achieves significant emission reductions, with the Rankine cycle and cooling mechanisms playing essential roles in optimizing fuel utilization and overall environmental performance. At lower PR values (PR = 6-9), emissions decrease more substantially, reaching up to 41.3%, due to greater waste heat recovery and a more pronounced cooling effect. However, at higher PR values (PR > 12), the percentage drops to 27.1% as the Brayton cycle's inherent efficiency improves, reducing the relative impact of the Rankine cycle and cooling.

The overall efficiencies of the MIPCC system, represented by the first-law efficiency (η_I) and second-law (exergy) efficiency (η_{II}), are crucial for evaluating the system's thermodynamic performance. At lower pressure ratios (PR = 6), η_I is 44.55%, benefiting from improved heat transfer and reduced irreversibilities. As PR increases, η_I reaches a peak of 46.48% at PR = 12 due to the balanced contributions of the Brayton and Rankine cycles, which optimize thermal energy utilization and work output. However, at higher PR values (PR > 12), increased compressor work reduces the fraction of input energy converted into useful work, causing η_I to decline slightly to 46.25% at PR = 18. The second-law efficiency (η_{II}) follows a similar trend, starting at 46.14% at PR = 6 and peaking at 48.08% at PR = 12, primarily due to the Rankine cycle's role in recovering waste heat and minimizing irreversibilities. At higher PR values (PR > 12), η_{II} decreases slightly to 47.9%, as exergy destruction becomes more significant in components like the compressor and heat exchangers. The PR range of 9-12 is

identified as the optimal operating range, balancing the contributions of the Brayton and Rankine cycles while maintaining high efficiency and minimizing losses.

The specific cost of energy ($C_{electricity}$) in the MIPCC system shows a distinct trend: it decreases initially with increasing pressure ratio (PR), reaching a minimum of 69.92 $/MWh at PR = 9, and then rises steadily to 77.33 $/MWh at PR = 18. The system operates less efficiently at low PR values due to lower Brayton cycle efficiency and limited energy recovery from the Rankine cycle, resulting in higher energy costs. The system achieves optimal performance at moderate PR values (PR = 9-12), with high thermal efficiency (ηI) and effective waste heat recovery, minimizing $C_{electricity}$. However, at high PR values (PR = 13-18), the specific cost increases due to higher compressor power consumption, reduced contributions from the Rankine cycle caused by lower turbine exhaust temperatures, and increased system irreversibilities. To minimize $C_{electricity}$, the system should operate within the optimal PR range of 9-12, enhance the Rankine cycle's heat recovery capabilities, and reduce compressor irreversibilities.

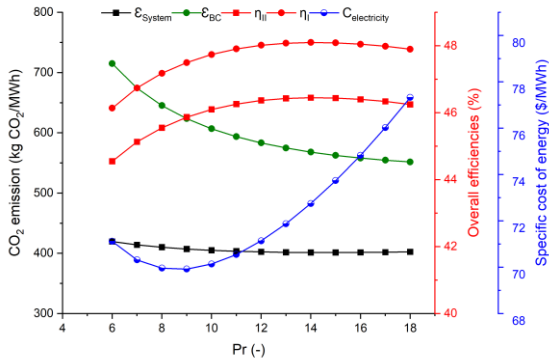


Figure 3. Impact of pressure ratio (PR) on CO_2 emissions, overall efficiencies, and specific cost of energy for the MIPCC system.

Figure 4 highlights the influence of varying gas turbine inlet temperature (GTIT) on the MIPCC system performance metrics. The results reflect significant trends in the network (W_{net}), Brayton cycle work (W_{BC}), Rankine cycle work (W_{RC}), and cooling load ($Q_{cooling}$). The findings reveal that increasing GTIT enhances overall system performance by boosting work outputs from both the Brayton and Rankine cycles while providing higher cooling capacity. As the GTIT increases, the W_{net} improves significantly, rising from 117.4 MW at GTIT=1100K to 315.2 MW at GTIT=1600K. This enhancement is driven by the greater energy supplied to the gas turbine, boosting W_{BC}, which increases from 87.73 MW to 224.5 MW. Simultaneously, the W_{RC} exhibits consistent growth, rising from 29.71 MW to 115.5 MW, as the elevated GTIT increases the exhaust temperature and heat energy supplied to the HRSG. The $Q_{cooling}$ grows with T_4, ranging from 45.21 MW to 59.5 MW.

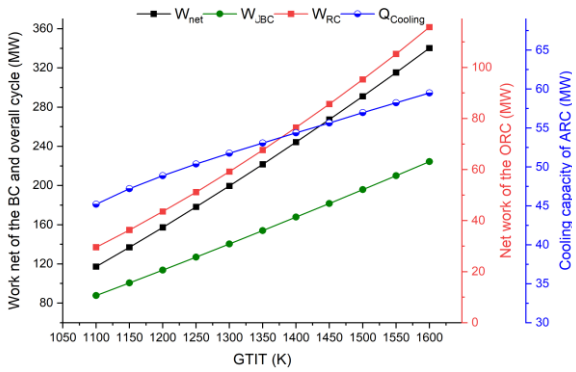


Figure 4. Effect of Gas Turbine Inlet Temperature (GTIT) on Work Outputs and Cooling Capacity in the MIPCC System.

Figure 5 demonstrates that increasing GTIT enhances the performance of the MIPCC system across key metrics, including efficiencies, emissions, and economic cost. Operating within the GTIT range of 1450-1500 K achieves the best balance between thermodynamic efficiency, environmental sustainability, and economic viability. The results showed that the MIPCC system's lower CO_2 emissions are a direct result of the Rankine cycle's ability to utilize waste heat and the additional contribution of the absorption cycle. Together, these processes reduce the amount of exhaust gases released into the atmosphere, significantly improving efficiency and reducing environmental impact. Without these integrations, the exhaust from the Brayton cycle would result in higher direct emissions. The system's emissions (ε_{system}) steadily decrease as GTIT increases, dropping from 478.2 kg CO_2/MWh at GTIT = 1100 K to 371 kg CO_2/MWh at GTIT = 1600 K. In comparison, the Brayton cycle's emissions (ε_{BC}) are consistently higher, decreasing from 665.6 kg CO_2/MWh at GTIT = 1100 K to 569.6 kg CO_2/MWh at GTIT = 1600 K. These trends demonstrate superior efficiency and reduce the environmental impact of the MIPCC system compared to the standalone Brayton cycle, as the integration of the Rankine cycle enables better utilization of waste heat and reduced fuel consumption. The system's second-law efficiency (η_{II}) increases with the GTIT, rising from 38.32% at GTIT = 1100 K to 50.56% at GTIT = 1600 K. This improvement reflects reduced irreversibilities, particularly in the HRSG and Rankine cycle, as waste heat from the Brayton cycle is effectively converted into additional work, minimizing exergy destruction. Similarly, the first-law efficiency (η_I) also rises, from 39.68% at GTIT = 1100 K to 52.46% at GTIT = 1600 K. Enhanced thermal efficiency ensures less energy is wasted as heat, requiring less fuel for the same energy output. The specific cost of energy ($C_{electricity}$) decreases initially as the gas turbine inlet temperature (GTIT) increases, reaching its lowest value of 63 $/MWh at GTIT = 1450 K. However, at higher GTIT values, it begins to rise slightly. This trend is influenced by increased operational and maintenance demands, as well as greater thermal stress and exergy destruction at elevated GTIT levels, resulting in a higher cost per unit of energy.

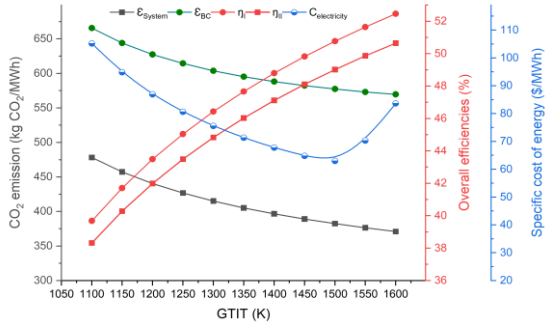


Figure 5. Impact of gas turbine inlet temperature (GTIT) on CO_2 emissions, overall efficiencies, and specific cost of energy for the MIPCC system.

Figure 6 illustrates the effect of HPSTIT (High-Pressure Steam Turbine Inlet Temperature) on key performance metrics of the MIPCC system, including the Brayton Cycle work (W_{BC}), Rankine Cycle work (W_{RC}), network (W_{net}), and cooling capacity ($Q_{cooling}$). The results show that the WBC remains constant at 156.8 MW across all HPSTITs, as it is independent of the inlet temperature and primarily relies on turbine and compressor performance. In contrast, the W_{RC} decreases slightly as HPSTIT drops, declining from 69.31 MW at HPSTIT = 800 K to 67.67 MW at HPSTIT = 620 K. This reduction occurs because lower HPSTIT reduces the thermal energy supplied to the high-pressure steam turbine, resulting in diminished heat recovery from the HRSG and, consequently, lower power generation in the Rankine cycle. W_{net} slightly decreases from 226.1 MW at HPSTIT = 800 K to 224.4 MW at HPSTIT = 620 K. The combined contributions of the Brayton and Rankine cycles influence the network. Since W_{BC} remains constant, the decrease in W_{net} is directly linked to the reduction in WRC as HPSTIT decreases. The $Q_{cooling}$ decreases consistently as HPSTIT decreases, dropping from 53.5 MW at HPSTIT = 800 K to 45.17 MW at HPSTIT = 620 K. When HPSTIT increases, the generator inlet temperature rises, leading to greater heat input to the generator and a higher cooling load. Conversely, a lower HPSTIT reduces the thermal energy supplied to the generator, resulting in a decreased cooling load.

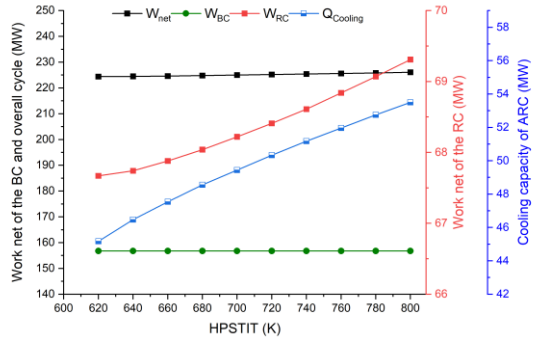


Figure 6. Effect of HPSTIT (High-Pressure Steam Turbine Inlet Temperature) on Work Outputs and Cooling Capacity in the MIPCC System.

Figure 7 shows how the HPSTIT influences the key performance metrics of the MIPCC system, such as CO_2 emissions (ε_{system} and ε_{BC}), first-law efficiency (η_I), second-law efficiency (η_{II}), specific cost of energy ($C_{electricity}$). The results present a slight increase in the system's CO_2 emissions (ε_{system}) as HPSTIT decreases primarily due to the reduced performance of the Rankine cycle in recovering waste heat from the Brayton cycle exhaust. At higher HPSTIT values, the Rankine cycle operates more efficiently because the higher inlet temperature provides greater thermal energy for steam expansion in the turbine, enabling the Rankine cycle to generate more work. This reduces CO_2 emissions. As HPSTIT decreases, the thermal energy available for the Rankine cycle diminishes, resulting in less work being produced. This forces the system to rely more heavily on the Brayton cycle to meet the required power output. Since the Brayton cycle has higher specific CO_2 emissions and operates independently of HPSTIT, the overall system's CO_2 emissions increase slightly due to the reduced contribution from the Rankine cycle. In contrast, the Brayton cycle's CO_2 emissions (ε_{BC}) remain constant at 593.8 kg CO_2/MWh because the Brayton cycle's fuel consumption is independent of the HPSTIT and solely depends on its own thermodynamic conditions, such as the gas turbine inlet temperature and compressor work. The second-law efficiency (η_{II}) decreases slightly as the HPSTIT decreases, ranging from 46.27% at HPSTIT = 800 K to 45.93% at HPSTIT = 620 K. At higher HPSTIT, the Rankine cycle has greater thermal energy input, enabling it to recover more waste heat from the Brayton cycle's exhaust. This leads to more efficient conversion of thermal energy into work, reducing irreversibilities and improving η_{II}. As HPSTIT decreases, the thermal energy entering the high-pressure steam turbine is reduced, limiting the Rankine cycle's ability to recover waste heat effectively. This increases the relative irreversibilities in the system, causing a slight decline in η_{II}. Similarly, the first-law efficiency (η_I) marginally decreases, from 47.92% at HPSTIT = 800 K to 47.57% at HPSTIT = 620 K, as the reduced thermal energy supplied to the steam turbine limits its power generation capacity, slightly lowering the overall efficiency of the system. The specific cost of energy ($C_{electricity}$) increases as the HPSTIT decreases, rising from 70.49 $/MWh at HPSTIT = 800 K to 73.31 $/MWh at HPSTIT = 620 K. This trend is driven by the reduced contribution of the Rankine cycle to the overall power output at lower HPSTIT, which raises the specific cost of energy.

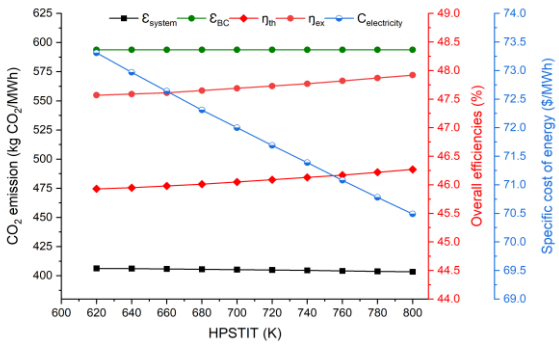


Figure 7. Effect of high-pressure steam turbine inlet temperature (HPSTIT) on system efficiency, CO_2 emissions, and specific energy cost in the MIPCC system.

Figure 8 demonstrates how the HPSTIP (High-Pressure Steam Turbine Inlet Pressure) affects the work output and cooling capacity in the MIPCC system. The findings reveal that the W_{BC} remains constant at 156.8 MW across all HPSTIP, as its performance is unaffected by changes in HPSTIP, being determined solely by the gas turbine and compressor. In contrast, the W_{RC} steadily increases with higher HPSTIP, rising from 64.36 MW at 60 bar to 72.63 MW at 150 bar. This improvement is due to enhanced thermodynamic efficiency in the Rankine cycle, as the higher pressure allows steam to expand more effectively in the turbine, generating greater output and contributing significantly to overall system performance. Consequently, the W_{net} of the system also increases with HPSTIP, growing from 221.1 MW at 60 bar to 229.4 MW at 150 bar, reflecting the direct impact of the Rankine cycle's enhanced output. Conversely, the cooling capacity ($Q_{cooling}$) decreases with increasing HPSTIP, from 56.18 MW at 60 bar to 51.2 MW at 150 bar, as higher HPSTIP leads to more efficient energy conversion in the Rankine cycle, reducing the amount of heat that needs to be rejected as waste, and lowering the heat enters to the generator.

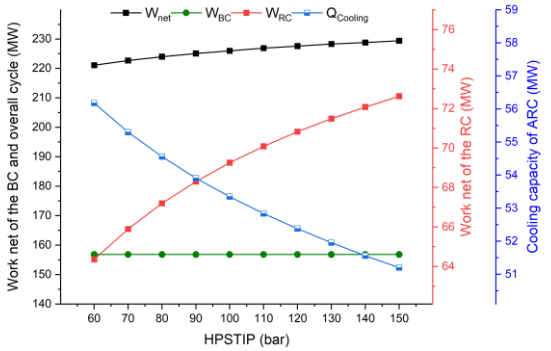


Figure 8. Effect of HPSTIP (High-pressure steam turbine inlet pressure) on work outputs and cooling capacity in the MIPCC system.

Figure 9 illustrates how variations in HPSTIP impact key performance metrics of the MIPCC power plant, including CO_2 emissions (ε_{system} and ε_{BC}), system efficiencies (η_{II} and η_I), and the specific cost of energy ($C_{electricity}$). The system's CO_2 emissions decrease as HPSTIP increases, from 412.3 kg CO_2/MWh at HPSTIP = 60 bar to 397.7 kg CO_2/MWh at HPSTIP = 150 bar. As HPSTIP increases, the Rankine cycle becomes more efficient due to improved steam expansion in the turbine. This allows the system to recover more waste heat and generate more power without additional fuel consumption, reducing CO_2 emissions per unit of energy produced. ε_{BC} remains constant at 593.8 kg CO_2/MWh across all HPSTIP values. The Brayton cycle's emissions are solely determined by its fuel consumption, which is unaffected by changes in HPSTIP. η_{II} improves steadily from 45.26% at HPSTIP = 60 bar to 46.95% at HPSTIP = 150 bar. The second-law efficiency reflects the system's ability to minimize irreversibilities and effectively utilize available exergy. Higher HPSTIP enhances steam expansion in the turbine, improving energy recovery in the Rankine cycle and reducing exergy losses. This leads to a gradual improvement in η_{II}. η_I increases from 46.87% at HPSTIP = 60 bar to 48.62% at HPSTIP = 150 bar. Higher HPSTIP improves the thermodynamic performance of the Rankine cycle, increasing its contribution to the total work output and enhancing the system's overall thermal efficiency. $C_{electricity}$ decreases from 73.28 $/MWh at HPSTIP = 60 bar to 68.81 $/MWh at HPSTIP = 150 bar. As HPSTIP increases, the Rankine cycle generates more power due to better energy recovery from the steam turbine. This reduces operational costs, resulting in a lower specific cost of energy.

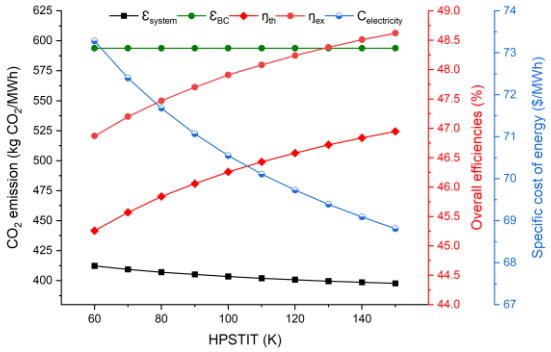


Figure 9. Effect of high-pressure steam turbine inlet pressure (HPSTIP) on system efficiency, CO_2 emissions, and specific energy cost in the MIPCC system.

6. Conclusion

This study addresses Yemen's pressing energy challenges by investigating the Marib integrated power and cooling cycle (MIPCC), centered around the Marib power plant, as a potential future solution. The proposed system enhances power generation and cooling efficiency by utilizing waste heat from the gas turbine exhaust. Using a simulation-based approach, the system's performance was validated against reference data, with cooling loads and efficiencies systematically evaluated to ensure optimal performance. The main findings of the study are as follows:C

- The MIPCC system makes efficient use of waste heat, leading to a 47.91% improvement in energy efficiency and a 46.26% boost in exergy efficiency compared to standalone systems.
- CO2 emissions were significantly reduced to 403.5 kg/MWh, and the specific cost of electricity dropped to 70.55 $/MWh, demonstrating the system's environmental and economic benefits.
- The system provides a cooling capacity of 53.5 MW with a COP of 0.808, ensuring reliable cooling performance even under harsh conditions.
- The Rankine cycle's use of waste heat proved to be a key driver for improving efficiency and power output, outperforming other standalone configurations.
- Compared to traditional setups, the MIPCC system achieved lower emissions, and higher

power generation, making it a more sustainable and efficient option.

- The economic analysis showed a promising payback period, confirming the system's viability as a practical solution to Yemen's energy shortages.

Overall, the MIPCC system provides a sustainable, efficient, and cost-effective solution for enhancing energy stability in regions with similar challenges. Future research should focus on experimental validation to confirm simulation results, optimizing thermodynamic and economic performance for large-scale deployment, and integrating renewable energy sources like solar or biomass to improve sustainability. Additionally, a comprehensive techno-economic assessment across diverse geographical locations with varying climates and resource availability will be crucial for broader applicability and long-term feasibility.

Author Contributions

The percentages of the author' contributions are presented below. The author reviewed and approved the final version of the manuscript.

	A.A.
C	100
D	100
S	100
DCP	100
DAI	100
L	100
W	100
CR	100
SR	100
PM	100
FA	100

C=Concept, D=design, S=supervision, DCP=data collection and/or processing, DAI=data analysis and/or interpretation, L=literature search, W=writing, CR=critical review, SR=submission and revision, PM=project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans.

References

Aghaei AT, Saray RK. 2021. Optimization of a combined cooling, heating, and power (CCHP) system with a gas turbine prime mover: A case study in the dairy industry. Energy 229: 120788. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120788.

Aghaziarati Z, Aghdam AH. 2021. Thermoeconomic analysis of a novel combined cooling, heating and power system based on solar organic Rankine cycle and cascade refrigeration cycle. Renew Energy 164: 1267-1283. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.10.106.

Akroot A, Al Shammre AS. 2024. Techno-Economic and Environmental Impact Analysis of a 50 MW Solar-Powered Rankine Cycle System. Processes 12: 1059. https://doi.org/10.3390/pr12061059.

Al-Attab K. 2014. Enhancement of Marib Gas Turbine Power Station Using Recuperator. J Eng Sci 3: 80-94.

Alfaris A, Akroot A, Deniz E. 2024. The Exergo-Economic and Environmental Evaluation of a Hybrid Solar-Natural Gas Power System in Kirkuk. Appl Sci 14: 10113. https://doi.org/10.3390/app142210113.

Chu S, Zhang H, Chen H. 2023. Energy, exergy, energy-saving, economic and environmental analysis of a micro-gas turbine-PV/T combined cooling, heating and power (CCHP) system under different operation strategies: Transient simulation. Energy Convers Manag 276: 116557. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.116557.

El-Emam RS, Dincer I. 2013. Exergy and exergoeconomic analyses and optimization of geothermal organic Rankine cycle. Appl Therm Eng 59: 435-444. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.005.

Ghorbani S, Deymi-Dashtebayaz M, Dadpour D, Delpisheh M. 2023. Parametric study and optimization of a novel geothermal-driven combined cooling, heating, and power (CCHP) system. Energy 263: 126143. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.126143.

He X, Li CC, Wang H. 2022. Thermodynamics analysis of a combined cooling, heating and power system integrating compressed air energy storage and gas-steam combined cycle. Energy 260: 125105. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.125105.

Jain V, Sachdeva G, Kachhwaha SS. 2015. Energy, exergy, economic and environmental (4E) analyses based comparative performance study and optimization of vapor compression-absorption integrated refrigeration system. Energy 91: 816-832. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.08.041.

Kumar A, Kumar K, Kaushik N, Sharma S, Mishra S. 2010. Renewable energy in India: Current status and future potentials. Renew Sustain Energy Rev 14: 2434-2442. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.04.003.

Liao G, Liu L, Zhang F, Jiaqiang E, Chen J. 2019. A novel combined cooling-heating and power (CCHP) system integrated organic Rankine cycle for waste heat recovery of bottom slag in coal-fired plants. Energy Convers Manag 186: 380-392. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.02.072.

Nami H, Arabkoohsar A, Anvari-Moghaddam A. 2019. Thermodynamic and sustainability analysis of a municipal waste-driven combined cooling, heating and power (CCHP) plant. Energy Convers Manag 201: 112158. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.112158.

Noroozian A, Mohammadi A, Bidi M, Ahmadi MH. 2017. Energy, exergy and economic analyses of a novel system to recover waste heat and water in steam power plants. Energy Convers Manag 144: 351-360. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.04.067.

Nourpour M, Khoshgoftar Manesh MH, Pirozfar A, Delpisheh M. 2023. Exergy, Exergoeconomic, Exergoenvironmental, Emergy-based Assessment and Advanced Exergy-based Analysis of an Integrated Solar Combined Cycle Power Plant. Energy Environ 34: 379-406. https://doi.org/10.1177/0958305X211063558.

Parikhani T, Azariyan H, Behrad R, Ghaebi H, Jannatkhah J. 2020. Thermodynamic and thermoeconomic analysis of a novel ammonia-water mixture combined cooling, heating, and power (CCHP) cycle. Renew Energy 145: 1158-1175.

Rostamzadeh H, Ghaebi H, Parikhani T. 2018. Thermodynamic and thermoeconomic analysis of a novel combined cooling and power (CCP) cycle. Appl Therm Eng 139: 474-487. https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.05.001.

Salimi M, Hosseinpour M, Mansouri S, Borhani TN. 2022. Environmental aspects of the combined cooling, heating, and power (CCHP) systems: a review. Processes 10: 711.

Talal W, Akroot A. 2024. An Exergoeconomic Evaluation of an Innovative Polygeneration System Using a Solar-Driven Rankine Cycle Integrated with the Al-Qayyara Gas Turbine Power Plant and the Absorption Refrigeration Cycle. Machines 12: 133. https://doi.org/10.3390/machines12020133.

Wang J, Dai Y, Sun Z. 2009. A theoretical study on a novel combined power and ejector refrigeration cycle. Int J Refrig 32: 1186-1194. https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2009.01.021.

Wang J, Ma C, Wu J. 2019. Thermodynamic analysis of a combined cooling, heating and power system based on solar thermal biomass gasification. Appl Energy 247: 102-115. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.04.039.

Wu C, Xu X, Li Q, Li J, Wang S, Liu C. 2020. Proposal and assessment of a combined cooling and power system based on the regenerative supercritical carbon dioxide Brayton cycle integrated with an absorption refrigeration cycle for engine waste heat recovery. Energy Convers Manag 207: 112527. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.112527.

Wu D, Zuo J, Liu Z, Han Z, Zhang Y, Wang Q. 2019. Thermodynamic analyses and optimization of a novel CCHP system integrated organic Rankine cycle and solar thermal utilization. Energy Convers Manag 196: 453-466. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.06.020.

Yang K, He Y, Du N, Yan P, Zhu N, Chen Y. 2024. Exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analyses of novel solar- and biomass-driven trigeneration system integrated with organic Rankine cycle. Energy 301: 364-378. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131605.

Yin J, Yu Z, Zhang C, Tian M, Han J. 2018. Thermodynamic analysis of a novel combined cooling and power system driven by low-grade heat sources. Energy 156: 319-327. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.05.070.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1619839

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 824-830 / May 2025

A COST-EFFECTIVE WIDE-BAND ANTENNA FOR 5G COMMUNICATION SYSTEMS

Gürkan KALINAY[1], İremnur DURU[2]*, Timuçin Emre TABARU[2], Fatih KABURCUK[2]

[1]*Erzurum Technical University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronic Engineering, 25550, Erzurum, Türkiye*
[2]*Sivas University of Science and Technology, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical-Electronics Engineering, 58000, Sivas, Türkiye*

Abstract: This study addresses the design of a wide-band microstrip patch antenna for 5G mobile communication systems. To respond to the increasing data rate and wide bandwidth needs in fifth-generation communication systems, it is very important to increase the performance of the antennas used. In this paper, a manufacturable and compact microstrip patch antenna design operating at 28 GHz wave frequency is realized and the simulation results are compared with the measured results. The proposed antenna is designed using a low-cost FR-4 substrate. The primary motivation behind calling the antenna "cost effective" in this study is the choice of the FR-4 substrate, which is significantly more affordable than other high-performance materials commonly used for 5G antennas, such as Rogers RT Duroid. Despite the limitations of FR4 substrate at high frequencies, this study demonstrates that a functional and efficient wide-band antenna can still be achieved through careful design and optimization. The performance of the antenna is evaluated with parameters such as input reflection coefficient (S_{11}), bandwidth, gain, and radiation efficiency of the antenna. The simulations of the proposed antenna are performed using CST and CEMS programs and the obtained results show that the antenna has a wide bandwidth of 1950 MHz between 26.85 GHz and 28.8 GHz. A parametric study of the antenna is performed to show the effect of substrate thickness and patch size on antenna performance. Numerical and measured results show that the proposed microstrip patch antenna has good performance for 5G communication systems, including wide bandwidth, high gain and low reflection coefficient. The antenna fabricated on the low-cost FR4 substrate can be useful for 5G communication systems with its cost-effectiveness and compact geometric configuration.

Keywords: 5G, Microstrip patch antenna, CST, CEMS, Low-cost antenna

***Corresponding author:** *Sivas University of Science and Technology, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical-Electronics Engineering, 58000, Sivas, Türkiye*
E mail: iremduru@sivas.edu.tr (İ. DURU)
Gürkan KALINAY https://orcid.org/0000-0002-2362-4188
İremnur DURU https://orcid.org/0000-0001-5492-803X
Timuçin Emre TABARU https://orcid.org/0000-0002-1373-3620
Fatih KABURCUK https://orcid.org/0000-0002-7527-3850

Received: January 14, 2025
Accepted: April 09, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Kalınay G, Duru İ, Tabaru TE, Kaburcuk F. 2025. A cost-effective wide-band antenna for 5G communication systems. BSJ Eng Sci, 8(3): 824-830.

1. Introduction

The rapid development in communication industries has come with huge capacity and speed needs with the connection of devices to networks. Fourth generation (4G) communication technologies have been in use around the world since 2009 (Przesmycki et al., 2020). It is worth mentioning that the fifth generation (5G) is the updated version of 4G regarding speed, latency, capacity, and spectrum use, starting to take place in 2019 (Paul and Saha, 2021). Some unique features of 5G, which operate in several frequency ranges, can be listed as low cost, lower power consumption, vast area of coverage, strength of signal, and speed of data transfer (Darboe et al., 2019; Goyal and Shankar Modani, 2018a; Nahas, 2022). The main goal of 5G technology is faster and more reliable data transmission. The millimeter-wave band (mmWave) represents significant frequency ranges used in 5G networks. The mmWave frequency bands used for 5G connectivity are specified as 24.25-27.5, 27.5-29.5, 37-40, and 64-71 GHz (Lee et al., 2018). The 26 and 28 GHz frequency bands, determined by the Federal Communications Commission (FCC), are frequently encountered in the literature (Afif et al., 2020; Fonte et al., 2018; Lima De Paula et al., 2021). Additionally, some researchers have conducted studies to improve the radiation characteristics of microstrip antennas (Ezzulddin et al., 2022; Przesmycki et al., 2020). Due to their low profile, low cost, small size, and ease of production, microstrip patch antennas have become very effective in 5G wireless communication devices. Patch antennas stand out as planar antennas due to their low profiles and ease of integration into communication systems. Radiation characteristics, input reflection coefficients, gain values, and radiation patterns of patch antennas to be used in communication systems have been studied. To minimize the loss in the patch antenna, a low-loss dielectric material should be selected, the thickness of the substrate should be suitable for the designed antenna, the patch and ground plane materials should have good conductivity, proper grounding should be provided, and

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

the feed line should be suitable for the impedance of the antenna. In patch antenna design, gain-size-application issues need to be optimized according to the desired specification. Patch antennas normally have gains between 2 dB and 12 dB (Kumar et al., 2023). Optimization of an antenna design is carried out to increase radiation efficiency and to decrease conductor losses by reducing surface roughness. Evaluated based on optimized values, performance of the antenna is assessed through parameters such as S_{11}, voltage standing wave ratio (VSWR), and radiation patterns. Another important parameter used in antenna evaluation is directivity, which ensures signals are transmitted more intensively and narrowly, thus preventing signal loss by sending high-powered signals. Increasing signal power improves transmission distance, which is crucial for wireless communication technologies. Increasing bandwidth and developing microstrip antennas with various methods are among the frequently discussed topics. To increase bandwidth, focus has been on slotting, using thicker substrates, selecting substrates with low permittivity, preferring structures with multiple resonances, and achieving impedance matching (Goyal and Shankar Modani, 2018b; Hakeem and Nahas, 2021; Jebabli et al., 2021). In antenna design for mobile communication systems, one of the challenges encountered is the lossy nature of the FR-4 substrate, a low-cost substrate, at high frequencies. Moreover, at high frequencies, the reduction in antenna size poses challenges such as soldering issues and precision limitations in manufacturing capabilities. There are various works available in the literature which present antennas operating in 5G frequencies featuring a beneficial bandwidth and geometry with an interesting gain. However, most of these were designed and manufactured on substrates of high cost and were not experimentally verified. However, in this study, a microstrip patch antenna designed and fabricated on a low-cost and lossy FR-4 substrate is proposed. Thus, the proposed antenna with lossy substrate provides suitable bandwidth, gain and input reflection coefficient values which make it a potential candidate for 5G systems, unlike antennas designed on high cost substrates as reported in the literature (Awan et al., 2019.; Fante et al., 2021; Przesmycki et al., 2020; Rahim et al., 2017; Yadav et al., 2021).

2. Materials and Methods

2.1. Antenna Geometry

The proposed antenna is designed and simulated to operate at 28 GHz on an FR-4 substrate. The geometry of the proposed microstrip antenna is shown in Figure 1 and its size parameters are tabulated in Table 1. The overall size of the antenna is 30 mm x 30 mm x 1.6 mm. The front surface of the substrate features a single radiating patch, while the back surface has a full ground plane. The design and analysis of the proposed antenna is carried out using the CST Student Version Software and a computational electromagnetic simulator (CEMS) software based on the finite-difference time-domain (FDTD) method. Thus, the consistency of the simulations is verified and tested for reliability before fabrication of the antenna. The proposed antenna is designed and simulated to operate at 28 GHz on an FR-4 substrate with a dielectric permittivity of 4.3, a thickness of 1.6 mm, and a loss tangent of 0.025. Numerical analysis of the antenna was conducted by a CEMS software based on the FDTD method (A. Z. Elsherbeni et al., 2016; V.Demir et al., 2021) as well as the CST Student Version software.

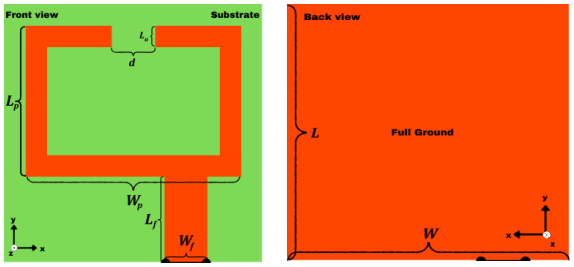


Figure 1. Front and back geometry of the proposed antenna.

When designing the antenna, it is essential to follow specific steps, namely the radiator patch design, feed line design, and matching element design. The most crucial parameters to consider during antenna design include the dielectric constant (ε_r) of the substrate, resonance frequency (f_r), and height of the substrate (h) (Balanis 2016; Goyal and Modani 2018).

The radiation efficiency is a crucial parameter for the antenna performance. For achieving good radiation efficiency, a practical width (W) is given as equality (equation 1) with the speed of light in free space v_0.

$$W = \frac{v_0}{2f_r}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \tag{1}$$

The effective dielectric constant of a (ε_{reff}) microstrip antenna is calculated using ε_r, h, and W in equation 2.

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} + \frac{1}{\sqrt{1 + 12\frac{h}{W}}} \tag{2}$$

The extension length (ΔL) are calculated using effective dielectric constant (ε_{reff}), h, and W in equation 3.

$$\Delta L = 0.412h\frac{(\varepsilon_{reff} + 0.3)(\frac{W}{h} + 0.264)}{(\varepsilon_{reff} - 0.258)(\frac{W}{h} + 0.8)} \tag{3}$$

For the patch antenna, the main length (L) is formulated using equation 4, which involves the speed of light in free space v_0, effective dielectric constant (ε_{reff}), and extension length (ΔL).

$$L = \frac{v_0}{2f_r\sqrt{\varepsilon_{reff}}} - 2\Delta L \tag{4}$$

For a given characteristic impedance Z_0 and dielectric constant (ε_r), it is expressed with the following equations 5 and 6 under the condition $\frac{W}{h} > 2$.

$$\frac{W}{h} = \frac{8e^{A}}{e^{2A} - 2} \quad (5)$$

$$A = \frac{z_o}{60}\sqrt{\frac{\varepsilon_r+1}{2}} + \frac{\varepsilon_r-1}{\varepsilon_r+1}\left(0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r}\right) \quad (6)$$

A quarter-wave transformer is a microstrip line used to match impedance mismatches. It aligns the impedance between the microstrip line and the width of the rectangular patch antenna along its center point. The equation for the quarter-wave transformer is given by the following equality (equation 7).

$$L_t = \frac{\lambda_g}{4} \quad (7)$$

The guided wavelength λ_g is given by the following equation 8.

$$\lambda_g = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (8)$$

The impedance equation for a quarter-wave transformer is given by the following equation 9.

$$Z_t = \sqrt{Z_o Z_p} \quad (9)$$

Assuming the feed line impedance Z_o is 50 Ω, Z_p denotes the impedance obtained across the width of the patch element. When resonance occurs, the input impedance at the center point is given by the following equations 10 and 11:

$$Z_p = \frac{1}{2G_1} \quad (10)$$

where;

$$G_1 \begin{cases} \frac{1}{90}\left(\frac{W}{\lambda_o}\right)^2 & W \le \lambda_o \\ \frac{1}{120}\left(\frac{W}{\lambda_o}\right) & W \ge \lambda_o \end{cases} \quad (11)$$

2.2. CEMS Simulation Parameters

When using the CEMS simulation, the problem domain is divided into cubic cells. The accuracy of the solution directly depends on the selection of cell sizes (Kaburcuk et al., 2021). To ensure numerical stability of the antenna, the cell size must be smaller than 1/20th of the shortest wavelength (λ_{min}) in the problem domain. For the numerical stability in the antenna simulation, a cell size is set uniformly to 0.1 mm in all directions. The CST Student Version Software is utilized to validate the accuracy of the FDTD-based CEMS simulation.

2.3. Parametric Study of the Proposed Antenna

2.3.1. Substrate thickness effects

In this study, the parametric study has focused on the effects of the substrate thickness (h) has upon the performance of the antenna, which was evaluated by means of the S_{11} (dB) in Figure 2. Three values of substrate thicknesses were investigated: 1 mm, 1.6 mm, and 2 mm. The following analysis is based on S_{11} parameters for each of those thickness values. Also these parametric studies were obtained using the CEMS. This parametric study presents that the antenna with a substrate thickness of 1.6 mm provides better performance for S_{11} values at the frequency of 28 GHz.

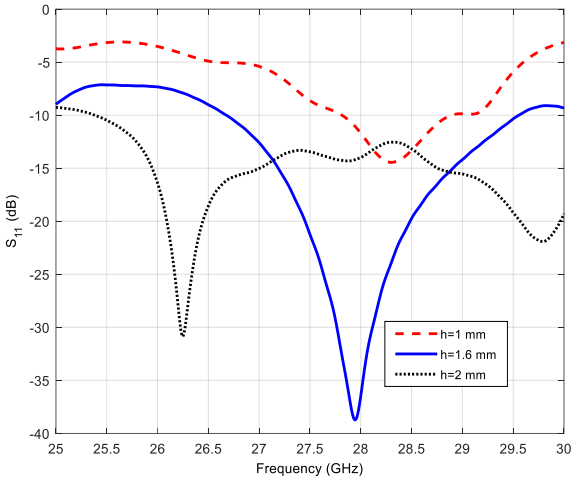


Figure 2. S_{11} obtained using CEMS for different thicknesses of FR-4 substrate (1, 1.6, and 2 mm)

2.3.2. Effect of distance between two radiation arms of antenna on S11 performance

This section presents a parametric study to show the effect of a slot distance between two radiation arms in the proposed antenna on S_{11} performance of the antenna at around 28 GHz. The simulations of the antenna have been performed when the slot distance between two radiation arms is 3, 5, and 7 mm. Figure 3 shows the S_{11} of the antenna for the slot distance of 3, 5, and 7 mm. The best performance for S_{11} values at aroud 28 GHz has been achieved when the slot distance is 5 mm. The minimum value of S_{11} is approximately -38 dB, indicating very good resonance and energy transmission efficiency at 28 GHz. Based on these two parameteric studies, the configuration of the proposed antenna has been determined to obtain a comparatively better performance for the antenna at 28 GHz. The dimensions of the proposed antenna are provided in Table 1.

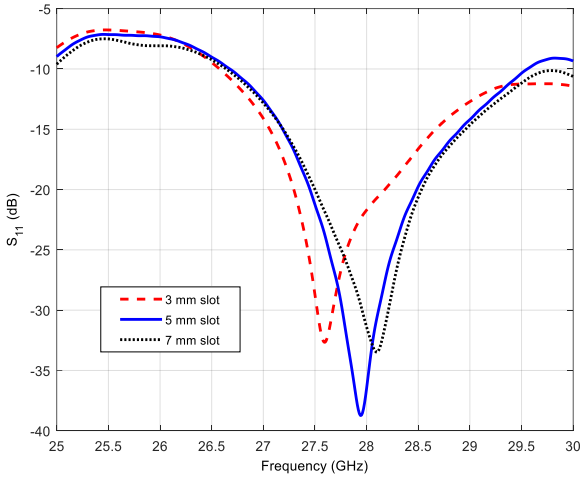


Figure 3. Simulated S_{11} for the slot distances of 3, 5, and 7 mm.

Table 1. Dimensions of the Proposed Antenna

Parameter	L	W	L_p	W_p	W_f	L_f	L_a	h	d
Dimension (mm)	30	30	17.5	25	5	10	5	1.6	5

4. Results and Discussion

4.1. Comparison of Simulated and Measured Results

The simulated and measured S_{11} of the proposed antenna obtained using both CEMS and CST simulators are shown in Figure 4 with good consistency between them. The S_{11} value at 28 GHz is around-19.5 dB obtained using CST, whereas it is around -35 dB obtained using CEMS at 28 GHz. The measured S_{11} value of the fabricated antenna at 28 GHz is about -25 dB. The S_{11} measurement over the frequency range has been performed using the Anritsu brand network analyzer. The difference between simulation and measured results can be caused by: SMA connector losses, soldering mistakes, imperfections during manufacturing, and even coaxial cable losses.

The gain performance of the antenna was analyzed across three different planes and shown in Figure 5 obtained by CEMS. The maximum values of the gain in the x-y, x-z, and y-z planes are 2.54, 8.29, 8.04 dBi at 28 GHz. All results obtained by CEMS and CST highlight that the antenna provides very strong radiation performance with high gain, wide bandwidth, and proper efficiency at 28 GHz, making it suitable for 5G communication applications.

Table 2. Simulation and measurement performances of the proposed antenna

	Resonance Freq. (GHz)	S_{11} (dB)	Freq. Range (GHz)	Gain (dBi)	Bandwidth (MHz)
Simulation (CST)	28.04	-19.5	23-31.2	6.52	8200
Simulation (CEMS)	27.85	-38	26.7-29.6	8.29	2900
Measurement	27.8	-25	26.85-28.8	-	1950

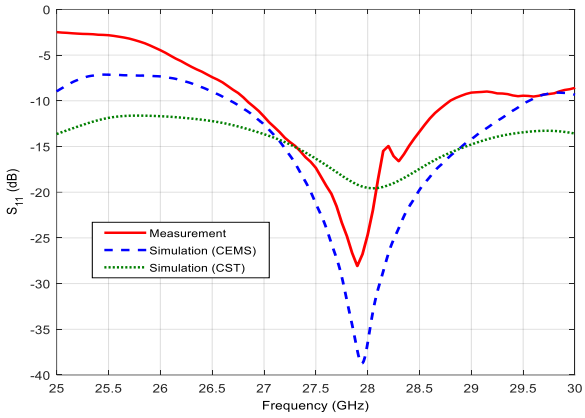


Figure 4. Comparison of measured and simulated S_{11} obtained using CEMS and CST.

The front and back views of the fabricated antenna are shown in Figure 6. For comparison purposes, the simulated and measured results of the proposed antenna are given in Table 3. Table 3 shows the trade-off between cost, bandwidth, and performance. While some studies have achieved a wider bandwidth with FR-4, it is known that bandwidth is not the sole criterion for antenna performance. Other factors such as gain, input reflection coefficient (S_{11}), and fabrication feasibility also play a significant role in determining the overall efficiency of an antenna. Our study establishes a balance between these parameters while ensuring manufacturability. This study for the 5G antennas aims to improve performance using cost-effective substrate and serving as an alternative to antennas on more expensive substrates.

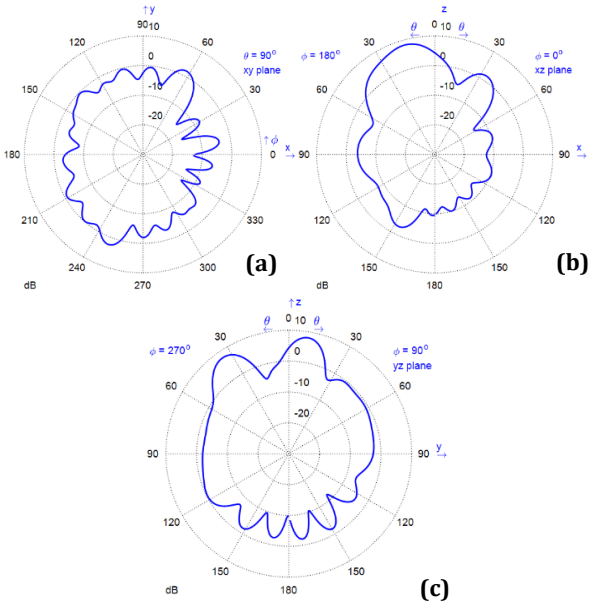


Figure 5. Gain patterns of the antenna on x-y (a), x-z (b) and y-z (c) planes at 28 GHz obtained using CEMS.

This study successfully demonstrates the design and fabrication of a wideband microstrip patch antenna operating at 28 GHz for 5G mobile communication systems. A low-cost FR-4 substrate, which is very well known to have limitations at high-frequency applications, is used in the antenna design. The proposed antenna design has been optimized to strike a balance between performance and cost-effectiveness. A parametric study was conducted on substrate thickness and slot size for optimum performance at target frequencies. The antenna was analyzed very rigorously using CST and CEMS

(c)

simulation tools for key performance measurements: input reflection coefficient, bandwidth and gain. A very good agreement was obtained between the simulated and measured results.

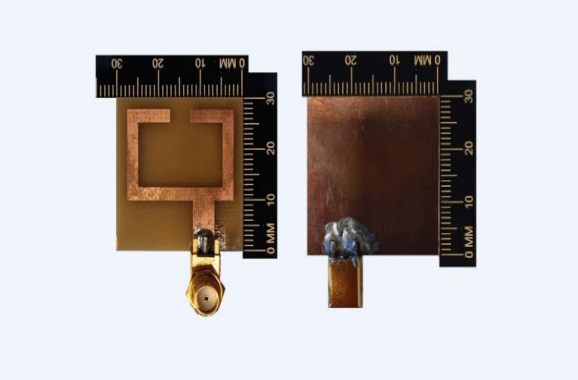


Figure 6. Front and back views of the fabricated antenna.

The measurement results show that the proposed antenna has a bandwidth of 1950 MHz and operates in the frequency range of 26.85 to 28.8 GHz. The measured input reflection coefficient of the antenna is around -25 dB at 28 GHz.

It also validates the antenna performance comparison with similar antennas in the literature, highlighting the competitive advantage in cost-sensitive applications where the use of high-performance antennas may not be suitable, especially on expensive substrates. Therefore, the proposed design offers a promising solution for 5G wireless communications where compactness, high gain, and wide bandwidth are critical. Overall, this design represents an effective and feasible alternative that can be successfully used in small-sized 5G devices with very good performance when considering the cost, and therefore would be a good candidate to be integrated into a future 5G communication system.

Table 3. A comparison of patch antenna at 28 GHz and previous works

Ref. No	Substrate	Frequency Range (GHz)	Resonance Frequency (GHz)	Reflection Coeff. (dB)	Gain (dBi)	BW (GHz)
(Darboe et al., 2019) *	RT Duroid 5880	27.95-28.38	27.95	-13.48	6.63	0.847
(Goyal and Shankar Modani, 2018b) *	Roger RT 5880	27.53-28.60	28.06	-17.4	6.72	1.1
(Mashade and Hegazy, 2018) *	FR-4	28	27.90	-15.35	6.92	-
(Hussain et al., 2021) **	ROGERS 4003	26.5 – 32.9	-	35.8	5.42	6.4
(Sellak et al., 2020) *	Taconic TLY-5 type	27.98-28.21	27.98	-36.17	6.71	0.23
(Mohammed et al., 2021) *	Air substrate	-	28	-39.49	9.55	1.72
(Merlin Teresa and Umamaheswari, 2022) *	FR-4	26.84-28	27.99	-27.79	6.37	2.62
(Hasan et al., 2022) *	Different materials (Rogers, Taconic, FR-4, Foam, RT Duroid)	-	28	(-26.24, -14.60) CST and HFSS	(5.39, 5.94) CST and HFSS	(0.708, 0.503) CST and HFSS
(Yadav et al., 2021) *	Rogers RT /duroid 5880	27.08-28.85	28	-33.50	9.04	1.767
(Mistri et al.,2023)**	Rogers RO4003	23.56-28.25	27.04-27.98	-21	6.65	4.69
(Munusami and Venkatesan, 2024)**	FR-4	26.04-28.44	27	-49.4	6.27	2.4
(Chowdhury et al.,2024)**	FR-4	26-29.4	28	-58.14	6.02	3.4
(Prop.) **	FR-4	26.85-28.8	28	-27	-	1950
(Kaburcuk et al., 2021) **	FR-4	24-28	28.2	-32.72	3.20 3.99	24 GHz 28 GHz

*Simulation Study

**Simulation and Fabrication Study

Author Contributions

The percentages of the authors' contributions are presented below. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

	G.K.	İ.D.	T.E.T.	F.K.
C	25	25	25	25
D	30	30	20	20
S	-	-	40	60
DCP	30	20	25	25
DAI	30	20	25	25
L	30	30	20	20
W	35	35	10	20
CR	30	30	20	20
SR	30	30	20	20
PM	20	20	30	30
FA	25	25	25	25

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans.

References

Afif RA, Isnawati AF, Danisya AR. 2020. Comparative analysis of mmWave channel model with 26 GHz and 28 GHz: A case study in Wonosobo City. In: 2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat), 17-18 December, Malang, Indonesia, pp: 380-384.

Awan WA, Zaidi A, Baghdad A. 2019. Patch antenna with improved performance using DGS for 28GHz applications. In: 2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), 3-4 April, pp: 1-4.

Balanis CA. 2015. Antenna theory: analysis and design. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, pp: 1104.

Chowdhury MZB, Islam MT, Hossain I, Samsuzzaman M. 2024. A compact 6-shaped high isolation MIMO antenna for 28 GHz 5G applications. Int J Commun Syst, e5991.

Darboe O, Konditi DBO, Manene F. 2019. A 28 GHz rectangular microstrip patch antenna for 5G applications. Int J Eng Res Technol, 12(6): 854-857.

de Paula IL, Lemey S, Bosman D, Van den Brande Q, Caytan O, Lambrecht J, Rogier H. 2020. Cost-effective high-performance air-filled SIW antenna array for the global 5G 26 GHz and 28 GHz bands. IEEE Antennas Wirel Propag Lett, 20(2): 194-198.

Demir V, Elsherbeni AZ. 2021. Computational electromagnetic simulator. Software package version, 4, Oxford, USA, pp:41.

EL Mashade MB, Hegazy EA. 2018. Design and analysis of 28GHz rectangular microstrip patch array antenna. WSEAS Trans Commun, 17(1): 9.

Elsherbeni AZ, Demir V. 2015. The finite-difference time-domain in electromagnetics. SciTech Publishing Inc, Raleigh, NC, USA, pp: 401.

Ezzulddin SK, Hasan SO, Ameen MM. 2022. Optimization of rectangular microstrip antenna patch parameters to operate with high radiation performances for 5G applications. In: AIP Conf Proc, 22-23 March, Najaf, Iraq, 2386(1).

Fante KA, Gemeda MT. 2020. Broadband microstrip patch antenna at 28 GHz for 5G wireless applications. Int J Electr Comput Eng, 11(3): 2238-2244.

Fonte A, Plutino F, Moquillon L, Razafimandimby S, Pruvost S. 2018. 5G 26 GHz and 28 GHz bands SiGe C receiver with very high-linearity and 56 dB dynamic range. In: 2018 13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), 23-25 September, Paris, France, pp: 57-60.

Goyal RK, Modani US. 2018. A compact microstrip patch antenna at 28 GHz for 5G wireless applications. In: 2018 3rd International Conference and Workshops on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 22-25 November, Kuala Lumpur, Malaysia, pp: 1-2.

Hakeem MJ, Nahas MM. 2021. Improving the performance of a microstrip antenna by adding a slot into different patch designs. Eng Technol Appl Sci Res, 11(4): 7469-7476.

Hussain N, Awan WA, Ali W, Naqvi SI, Zaidi A, Le TT. 2021. Compact wideband patch antenna and its MIMO configuration for 28 GHz applications. AEU Int J Electron Commun, 132: 153612.

Jebabli E, Hayouni M, Choubani F. 2021. Impedance matching enhancement of a microstrip antenna array designed for Ka-band 5G applications. In: 2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), 28 June-2 July, Harbin City, China, pp: 1254-1258.

Kaburcuk F, Kalinay G, Chen Y, Elsherbeni AZ, Demir V. 2021. A dual-band and low-cost microstrip patch antenna for 5G mobile communications. Appl Comput Electromagn Soc J (ACES), 36(7): 824-829.

Kumar DS, Pavithra S, Ranjith KS, Kiruthika R, Kavin E. 2023. Design and investigation of metamaterial antenna for wireless communication. In: 2023 7th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), 22-24 November, Coimbatore, India, pp: 1464-1468.

Lee J, Tejedor E, Ranta-aho K, Wan H, Lee KT, Semaan E, Jung S. 2018. Spectrum for 5G: Global status, challenges, and enabling technologies. IEEE Commun Mag, 56(3): 12-18.

Merlin Teresa P, Umamaheswari G. 2022. Compact slotted microstrip antenna for 5G applications operating at 28 GHz. IETE J Res, 68(5): 3778-3785.

Mistri RK, Singh AK, Mahto SK, Sinha R. 2023. Quad element millimetre-wave MIMO antenna for 5G communication. J Electromagn Waves Appl, 37(15): 1258-1273.

Mohammed AS, Kamal S, Ain MFB, Hussin R, Najmi F, Sundi SA, Othman M. 2021. Mathematical model on the effects of conductor thickness on the centre frequency at 28 GHz for the performance of microstrip patch antenna using air substrate for 5G application. Alex Eng J, 60(6): 5265-5273.

Munusami C, Venkatesan R. 2024. Cavity-backed substrate integrated waveguide MIMO element with enhanced isolation for 5G communication. Int J Commun Syst, 37(1): e5627.

Nahas M. 2022. A super high gain L-slotted microstrip patch antenna for 5G mobile systems operating at 26 and 28 GHz. Eng Technol Appl Sci Res, 12(1): 8053-8057.

Paul LC, Saha HK. 2021. A wideband microstrip line feed slotted patch antenna for 28 GHz 5G applications. In: 2021 International Conference on Electronics, Communications and Information Technology (ICECIT), 14-16 September, Khulna, Bangladesh, pp: 1-4.

Przesmycki R, Bugaj M, Nowosielski L. 2020. Broadband microstrip antenna for 5G wireless systems operating at 28 GHz. Electronics, 10(1): 1.

Rahim MA, Ibrahim IM, Kamaruddin RAA, Zakaria Z, Hassim N. 2017. Characterization of microstrip patch array antenna at 28

GHz. J Telecommun Electron Comput Eng (JTEC), 9(2-8): 137-141.

Rahman BA, Hasan SO. 2022. Simulation design of low-profile equilateral triangle microstrip patch antenna operating at 28 GHz. Int J Commun Antenna Propag, 12(2): 74.

Yadav R, Parmar A, Malviya L, Nitnaware D. 2021. 28 GHz inset feed circular shaped compact patch antenna array for 5G wireless communication. In: 2021 10th IEEE International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 18-19 June, Jabalpur, India, pp: 1-4.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1637324

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)
Cilt 8 - Sayı 3: 831-836 / Mayıs 2025
(Volume 8 - Issue 3: 831-836 / May 2025)

ANTİBAKTERİYEL VE AKUSTİK PERFORMANSLI KENEVİR ESASLI STETOSKOP DİYAFRAM MALZEMESİ GELİŞTİRİLMESİ

Tuğba MUTUK[1]*, Selim ARAS[2], Şevval EREN[1], Ahmet Anıl TÜMER[1]

[1]Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun, Türkiye
[2]Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun, Türkiye

Özet: Bu çalışmada, stetoskop diyafram malzemesi olarak sentetik lifler yerine doğal ve sürdürülebilir bir alternatif olan kenevir kumaş bazlı kompozit malzemelerin kullanımı incelenmiştir. Diyaframlara antibakteriyel özellik kazandırmak amacıyla borik asit ve nano TiO_2 katkıları eklenmiş, antibakteriyel testler sonucunda borik asit katkılı numunenin Escherichia coli ve Staphylococcus aureus bakterilerine karşı etkili olduğu, ancak nano TiO_2 katkılı numunenin bu çalışmada anlamlı bir antibakteriyel aktivite göstermediği belirlenmiştir. Diyaframın frekans yanıtı Bode diyagramı ile incelenmiş ve ticari malzemelerle karşılaştırılabilir düzeyde olduğu belirlenmiştir. Diyafram, 100 Hz - 1 kHz aralığında ses iletimini güçlendirerek akciğer seslerinin daha iyi algılanmasını sağlarken, kalp seslerinin duyulacağı 20-150 Hz aralığında net bir stabil yanıt sunmaktadır. Ayrıca, 5 kHz üzerindeki frekanslarda ise çevresel gürültüyü baskılayarak stetoskop kullanımının klinik ortamlarda daha verimli olmasına katkıda bulunmuştur. Kenevir kumaş bazlı diyaframların biyolojik olarak parçalanabilir, çevre dostu ve antibakteriyel özelliklere sahip olması, tıbbi cihaz üretiminde sürdürülebilir malzeme alternatifleri sunabileceğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, doğal ve çevre dostu malzemelerin tıbbi uygulamalarda kullanım potansiyeline dikkat çekerek, antibakteriyel ve geri dönüştürülebilir alternatiflerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Akustik performans, Antibakteriyel özellik, Kenevir kumaş, Kompozit

Development of Hemp Based Stethoscope Diaphragm Material with Antibacterial and Acoustic Performance

Abstract: In this study, the use of hemp fabric-based composite materials as a natural and sustainable alternative to synthetic fibers in stethoscope diaphragm production was investigated. Boric acid and nano TiO_2 additives were incorporated into the diaphragms to impart antibacterial properties. Antibacterial tests revealed that the boric acid-added sample was effective against Escherichia coli and Staphylococcus aureus bacteria, whereas the nano TiO_2-added sample did not exhibit significant antibacterial activity. The frequency response of the diaphragm was analyzed using a Bode diagram, and it was found to be comparable to commercial diaphragm materials. The diaphragm enhanced sound transmission within the 100 Hz - 1 kHz range, facilitating better perception of lung sounds, while providing a stable and clear response within the 20-150 Hz range, where heart sounds are detected. Additionally, attenuation at frequencies above 5 kHz contributed to reducing ambient noise, improving the efficiency of stethoscope use in clinical settings. The biodegradability, environmental friendliness, and antibacterial properties of hemp fabric-based diaphragms demonstrate their potential as sustainable material alternatives in medical device manufacturing. This study highlights the potential of natural and eco-friendly materials for medical applications and contributes to the development of antibacterial and recyclable alternatives.

Keywords: Acoustic performance, Antibacterial properties, Hemp fabric, Composite

***Sorumlu yazar (Corresponding author):** Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun, Türkiye
E mail: tugba.isitan@omu.edu.tr (T. MUTUK)

Tuğba MUTUK https://orcid.org/0000-0003-0143-2721
Selim ARAS https://orcid.org/0000-0003-1231-5782
Şevval EREN https://orcid.org/0009-0001-3657-6488
Ahmet Anıl TÜMER https://orcid.org/0009-0003-9599-7439

Gönderi: 11 Şubat 2024 **Received:** February 11, 2025
Kabul: 09 Nisan 2025 **Accepted:** April 09, 2025
Yayınlanma: 15 Mayıs 2025 **Published:** May 15, 2025

Cite as: Mutuk T, Aras S, Eren Ş, Tümer AA. 2025. Development of hemp based stethoscope diaphragm material with antibacterial and acoustic performance. BSJ Eng Sci, 8(3): 831-836.

1. Giriş

Çevresel farkındalığın artması sebebiyle çevre dostu ve uygun maliyetli malzemelerin farklı endüstriler için arayışı günümüzde hala devam etmektedir (Misnon et al., 2015; Mishra et al., 2002). Bu nedenle, petrol türevi olmayan sürdürülebilir, hafif ve yüksek performanslı yeni nesil malzemeleri geliştirmek gerekmektedir. Bitki biyokütleli ürünler, bu tür gelişmeler için umut vadeden birer hammaddedir. Bu tür ürünler için keten, kenevir, ısırgan vb. örnekler verilebilir. Bu ürünlerden kenevir, daha dairesel bir ekonomiye ulaşmaya katkıda bulunabilecek çok sayıda çevresel avantaja sahiptir. Kenevir bitkisinin tüm kısımları (kökler, lifler, tohumlar gibi) çeşitli endüstrilerde uygulama alanı bulmaktadır (Mohanty vd., 2018; Nishino vd., 2003).

Kenevir (Cannabis sativa), tarih boyunca hem tarımsal hem de tıbbi alanlarda kullanılan çok yönlü bir bitkidir. Kullanım alanları, türleri ve potansiyel faydaları oldukça geniştir. Kenevirin çok yönlü yapısı sayesinde pek çok sektörde kullanılmaktadır. Lifleri, tekstil ürünlerinde,

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

tohumu, gıda ve besin endüstrisinde, tıbbı ve yapı malzemesi gibi çeşitli alanlarda da kullanılmaktadır (Zamboulis et al., 2023; Crini et al., 2020; Promhuad et al., 2022).

Bu çalışmada doğal malzemelerden biri olan kenevir kumaşı kullanılmaktadır. Kenevir bitkisinin doğal liflerinin çeşitli işlemlerden geçirilmesi ve liflerin ayrıştırılmasıyla iplik haline dönüştürülmektedir ve böylece kenevir kumaşı elde edilmektedir. Bitkisel liflerden dokunan ve geleneksel yöntemlerle üretilen bir kumaş türüdür. Kenevir liflerinin biyolojik olarak parçalanabilirliği, düşük karbon ve su ayak izi ve yetişmesi sırasında CO_2 emilimi ile havayı temizleyebilme gibi özellikleri bulunmaktadır. Bu liflerden elde edilen kumaşların nefes alabilen, doğal antibakteriyel, organik ve yüsek nem çekme özellikleri bulunmaktadır (Khan et al., 2014; Bayram and Geyik Değerli, 2024; Palabıyık et al., 2024). Günümüzde çeşitli endüstrilerde daha çok sentetik, yapay lifler kullanılmaktadır. Bu tür, organik, çevresel kriterleri sağlayan ve sürdürülebilir özellikleri ile kenevir lifleri ve kumaşları sentetik liflere alternatif olma eğilimindedir (Malabadi et al., 2023; Scheibe et al., 2023; Antony et al., 2018).

Bu çalışma, günümüzde sentetik liflerin (örn: cam elyaf) kullanıldığı stetoskop diyafram malzemesine alternatif olarak doğal, sürdürülebilir liflerden üretilen kenevir kumaşının kullanılması üzerinedir. Kenevir kumaştan el yatırması yöntemi ile üretilen malzemeye; Borik asit (H_3BO_3) ve nano boyutta Titanyum dioksit (TiO_2) katılarak antibakteriyel özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu iki malzemenin kullanılmasının başlıca nedenleri, nano TiO_2 partikülleri, özellikle fotokatalitik özellikleri sayesinde antibakteriyel etki göstermektedir. Yapılan araştırmalar, TiO_2 nanopartiküllerinin farklı bakterilere karşı değişen düzeylerde antibakteriyel aktivite gösterdiğini ortaya koymaktadır (Vieira et al., 2023; Serov et al., 2024). Borik asit ise, sahip olduğu antibakteriyel özellikler sayesinde çeşitli alanlarda etkili bir bileşik olarak kullanılmaktadır (Meers and Chow, 1990; Yurtalan vd., 2024). Ayrıca çalışmada, ticari olarak kullanılan stetoskop diyafram malzemesi ile kenevir kumaştan üretilen malzemenin karşılaştırmalı frekans test analizleri yapılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

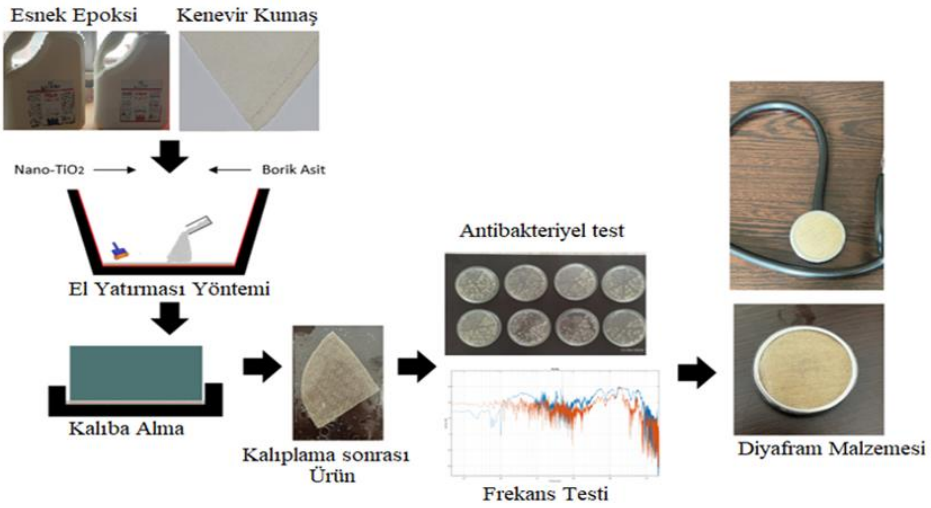
Stetoskop, tıbbi muayenelerde sağlık çalışanlarının kalp, akciğer ve diğer iç organ seslerini dinlemek için kullandığı bir cihazdır. Genellikle akustik sesleri yoğunlaştırarak doktorun hastanın vücudundaki anormal sesleri duymasını sağlar. Başlıca parçaları; kulaklıklar, boru (tüp) ve gövde (kafalık) olmak üzere üç kısımdan oluşur. Gövde kısmında diyafram ve çan adı verilen iki farklı dinleme yüzeyi bulunur. Diyafram, düz ve geniş bir yüzeydir; kalp ve akciğer sesleri gibi yüksek frekanslı sesleri dinlemek için kullanılır. Diyafram, ses dalgalarını titreşimlere dönüştürerek bu titreşimleri stetoskopun borusuna iletir. Bu seslerin yoğunlaştırılmasını ve kullanıcının kulaklıklarından net bir şekilde duyulmasını sağlar. Diyaframın malzeme seçimi ve tasarımı, sesin kalitesini ve hassasiyetini doğrudan etkiler (Hou et al.; Brandt, 2023; Nowak and Nowak, 2019). Mevcut teknikte stetoskop diyaframı için genellikle polimer bazlı ya da sentetik malzemelerden ve cam elyafından elde edilen malzemeler kullanılmaktadır. Bu tür malzemeler her hastada kullanıldığında mikroorganizma birikimi ve üremesinin önlenmesi adına sürekli dezenfekte edilmesi gerekmektedir. Ayrıca sentetik liflerden üretilen stetoskop diyafram malzemelerinin genellikle geri dönüşümü zor olmakta ve çevresel sürdürülebilirlik açısından sorunlar da yaratmaktadır. Bu çalışmada kenevir liflerinden elde edilen Şekil 1'de görülen yerel bir firmadan temin edilen kenevir kumaş kullanılmıştır. Kenevir kumaşı kalıplayabilmek için esnek epoksi ve reçine kullanılmıştır.



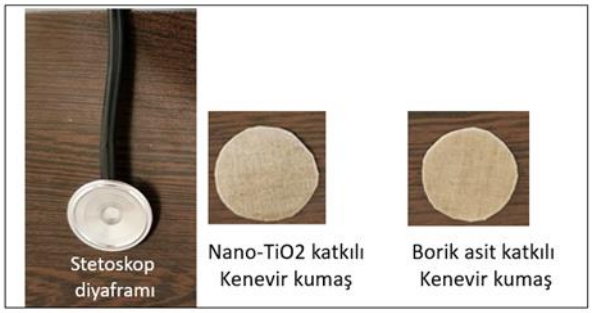
Şekil 1. Üretimde kullanılan doğal kenevir kumaş.

Üretilen malzemeye antibakteriyel özellik kazandırmak için iki ayrı malzeme ile borik asit ve nano TiO_2 (20-25 nm) katılarak, antibakteriyel testler ile karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 2 'de diyafram malzemesi üretim aşamaları görülmektedir. İlk aşamada karışım oluşturulmuştur. Karışımda 2:1 oranında esnek epoksi reçine ve sertleştirici kullanılmış, esnek epoksi reçinenin ağırlıkça %2'si kadar borik asit ve nano-TiO_2 denemeleri ayrı ayrı yapılmıştır. Sonraki aşamada karışım el yatırması yöntemi ile kumaşa uygulanmıştır. Bu üretim yöntemi, takviye malzemesi katmanlarının (fiberglas, karbon fiber veya diğer kumaşlar gibi) bir kalıba manuel olarak yerleştirildiği ve daha sonra bir reçine (polyester veya epoksi gibi) ile emprenye edildiği manuel bir kompozit üretim sürecidir. El yatırması üretim aşamalarında; kompozit parçanın yapışmasını önlemek için kalıba bir ayırma maddesi uygulanır. Kalıba takviye malzemesi levhaları veya katmanları yerleştirilir. Reçine, fırçalar, rulolar veya püskürtme tabancaları kullanılarak takviye üzerine uygulanır ve liflerin veya kumaşın tamamen ıslandığından emin olunur. Reçine emdirilmiş katmanların oda sıcaklığında veya ilave ısı ile kürlenmeye bırakılmaktadır. Bu yöntem, otomatik süreçlere kıyasla

esnekliği ve düşük ekipman maliyeti nedeniyle özel, düşük hacimli veya karmaşık şekilli kompozit parçalar üretmek için en uygun yöntemlerden biridir (Elkington et al., 2015a; Dwi and Syamsudin, 2021; Elkington et al., 2015b; Duffy, 2015). Bu çalışmada da karışım hazırlandıktan sonra kumaşa uygulanırken bu yöntem kullanılmış ve sonra oda sıcaklığında 24 saat kurumaya bırakılmıştır (Şekil 3). Sonraki aşamada üretilen numunelere antibakteriyel ve frekans testleri yapılmıştır.



Şekil 2. Diyafram malzemesi üretim aşamaları.

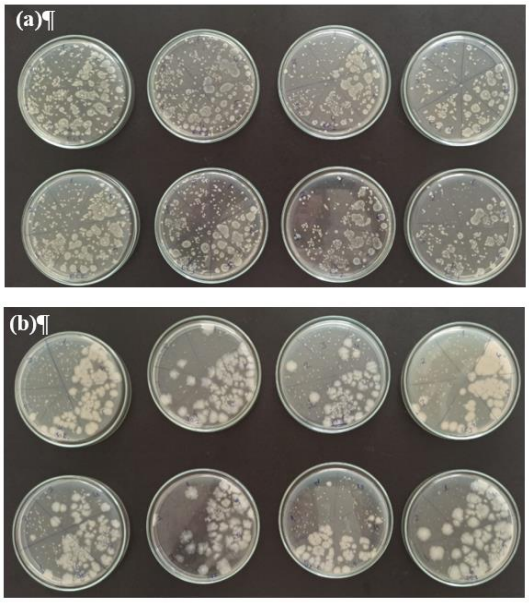


Şekil 3. El yatırması yöntemi ile üretilen katkılı malzemeler.

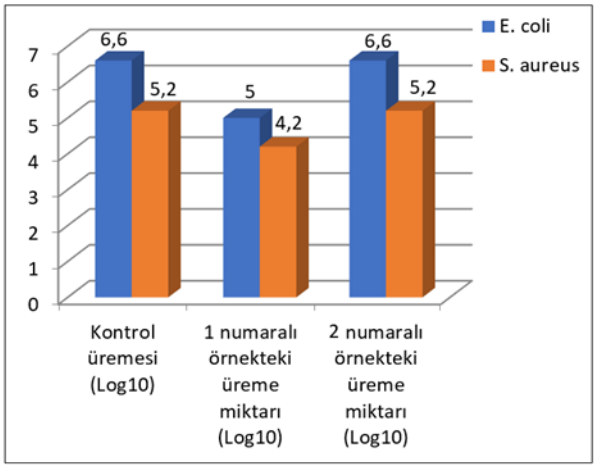
3. Bulgular ve Tartışma

Kenevir kompozit örneklerinin antibakteriyel aktivitesini test etmek için TS EN ISO 20743 uyarlama in house metod kullanılmıştır ve testler Karadeniz İleri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (KİTAM) gerçekleştirilmiştir. Escherichia coli (ATCC 25922) bakterisi $5x10^6$ CFU/ml ve Staphyloccus aureus (NCTC-13552) bakterisi 1,6 x 10^5 CFU/ml olacak şekilde 1 ml hazırlandı, içerisine numune örneklerinden 1x1 cm'lik örnekler konuldu. Örnekler konulmadan hazırlanan $5x10^5$ CFU/ml'lik kültür pozitif kontrol olarak kullanıldı. İçerisinde örnekler bulunan ependorf tüpleri 4 saat 150 rpm'de çalkalandı. Örneklerin yüzeyine yapışan mikroorganizmaları ayırmak için örneklerin bulunduğu tüpler ve pozitif kontrol olarak hazırlanan tüpler 30 sn ultrasonik su banyosunda bekletildi, ardından vortekslendi. 900 µL Fizyolojik tuzlu su (FTS) içerisine 100 µL süspansiyon aktarılarak 6 dilüsyon yapıldı. Mueller Hinton Agar (MHA) içeren petri kabı altıya bölünerek her dilüsyondan 25'er µL ekim yapıldı. 37 °C'de 24 saat inkübasyon sonucunda antimikrobiyal aktivite değeri Colonies Forming Units (CFU) sayıldı.

Pozitif kontrol ile polimerle muamele edilmiş kültür arasındaki üreme farkı logaritmik olarak değerlendirildi. Şekil 4 (a-b)'te farklı bakteri uygulamalarının 4 saat sonra katı besiyerinde ekim görüntüleri yer almaktadır. Şekil 5'te ise 1 (borik asit katkılı kenevir kompozit) ve 2 (nano TiO_2 katkılı kenevir kompozit) kodlu numunelerin kontrol numunesi ile karşılaştırmalı logaritmik durumu görülmektedir. Tablo 1'de de logaritmik olarak antimikrobiyal aktivite sonuçları verilmektedir.



Şekil 4. a) *E. coli* bakterisinin kenevir kompozit örnekleri ile 4 saat muamele edildikten sonra ekim görüntüleri b) *S. aureus* bakterisinin kenevir örnekleri ile 4 saat muamele edildikten sonra ekim görüntüleri.



Şekil 5. *E. coli* ve *S. aureus* bakterilerinin kontrol üremesi ve 1 ve 2 numaralı numuneler ile muamele edildikten sonraki üremelerinin logaritmik durumu.

Tablo 2'de, 1 ve 2 numaralı örneklerin antimikrobiyal aktivite sonuçları görülmektedir. Çalışma sonucuna bakıldığında kenevir örneklerinden 1 numaralı örneğin *E.coli* bakterisi üzerine 1,65 oranında bir logaritmik azaltma oluşturduğu, 1 numaralı örneğin *S. aureus* bakterisi üzerine antimikrobiyal aktivitesinin olduğu ve 10^5'ten 10^4'e kadar Log10 oranında azalma sağladığı gözlenmiştir. 2 numaralı örneğin hiçbir test mikroorganizması üzerine antimikrobiyal etkisinin olmadığı görülmüştür. Borik asit katkılı yani Tablo 1 ve 2'de de görülen 1 numaralı kenevir kompozit örneklerinin antimikrobiyal aktivitesi vardır ve oluşturdukları logaritmik azalma tablolarda ifade edilmiştir.

Tablo 1. 1 ve 2 numaralı örneklerin Logaritmik olarak antimikrobiyal aktivite sonuçları

Bakteri	Kontrol Üremesi	1 numaralı örnekteki üreme miktarı (Log_{10})	2 numaralı örnekteki üreme miktarı (Log_{10})
E. coli	6,6	5	6,6
S. aureus	5,2	4,2	5,2

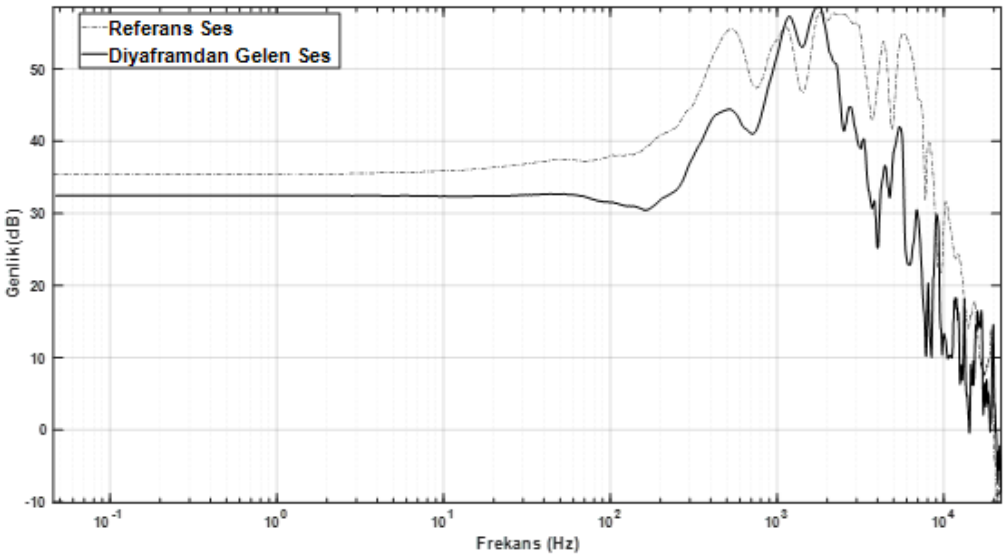
Tablo 2. 1 ve 2 numaralı örneklerin antimikrobiyal aktivite sonuçları

Bakteri	Kontrol Üremesi	1 numaralı örnekteki üreme miktarı (Log_{10})	Log_{10} - reduction	2 numaralı örnekteki üreme miktarı (Log_{10})	Log_{10} - reduction
E. coli	6,6	5	1,65	6,6	0
S. aureus	5,2	4,2	1,0	5,2	0

Kumaşlar için antimikrobiyal aktivite tayininde kullanılan ISO 20743 yönteminin uyarlaması olan yöntemle yapılan analizde 1 numaralı örneklerin antimikrobiyal etkinliğinin olduğu tespit edilmiştir.

Kenevir kumaş bazlı malzeme, stetoskopun diyafram kısmına yerleştirilerek akustik analizi gerçekleştirilmiştir. Analizin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için ses yalıtımlı bir anekoik kutu içerisine hoparlör ve stetoskopun algılayıcı ucu entegre edilmiştir. Hoparlörden 20-20 kHz frekans aralığında bilinen bir test sesi yayılarak stetoskop ile kaydedilmiş, elde edilen veriler doğrultusunda diyafram malzemesi olmadan kaydedilen referans ses ile geliştirilen diyafram malzemesinin tepkisi karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 6'da sunulan Bode diyagramı ile görselleştirilmiştir. Stetoskop diyaframının frekans yanıtı, stetoskopla dinlenen akciğer ve kalp seslerinin analizi açısından incelendiğinde, belirli frekans aralıklarını öne çıkaran ve diğer frekansları baskılayan yapısının biyolojik seslerin daha iyi algılanmasını desteklediği görülmüştür. Akciğer sesleri genellikle 100 Hz ile 1 kHz arasında bulunur. Bununla birlikte, düşük frekanslı solunum sesleri, örneğin 60 Hz'in altındaki bronşiyal sesler ve yüksek frekanslı ince sesler, özellikle raller, önemli tanısal bilgiler içermektedir. Yapılan analizler, diyaframın 100 Hz ile 1 kHz aralığında genlik artışı sağlayarak bu frekanslardaki sesi güçlendirdiğini göstermektedir. Bu özellik, özellikle raller veya wheezing gibi akciğer seslerinin algılanmasını kolaylaştırmaktadır. Aynı şekilde, düşük frekanslardaki stabilite, bronşiyal seslerin daha net duyulmasını sağlayarak tanı doğruluğunu artırma potansiyeline sahiptir.

Kalp sesleri genellikle 20 Hz ile 150 Hz aralığında yoğunlaşmaktadır. Kalp atışlarının birinci (S1) ve ikinci (S2) sesleri düşük frekanslı bileşenlerden oluştuğu için, stetoskop diyaframının bu aralıkta güçlü bir yanıt sunması, kalp seslerinin net ve belirgin bir şekilde duyulmasına olanak tanımaktadır. Düşük frekanslardaki tutarlı genlik, kalp seslerinin doğru şekilde algılanmasını desteklerken, 5 kHz üzerindeki frekanslarda gözlenen zayıflama, çevresel gürültüyü baskılayarak stetoskop kullanımını özellikle yoğun bakım veya ameliyathane gibi gürültülü ortamlarda daha etkili hale getirmektedir. Diyaframın akustik performansı, hem akciğer hem de kalp seslerinin doğru ve detaylı bir şekilde duyulmasını destekleyen üç temel özellikle karakterize edilmektedir. İlk olarak, düşük frekanslardaki yüksek hassasiyet sayesinde, 20-150 Hz aralığında kalp seslerinin net algılanması sağlanırken, akciğer seslerinde bronşiyal sesler ve düşük frekanslı solunum sesleri daha belirgin hale gelmektedir. İkinci olarak, 100 Hz ile 1 kHz aralığında gözlenen genlik artışı, akciğer seslerindeki raller ve wheezing gibi yüksek frekanslı bileşenlerin algılanmasını kolaylaştırmaktadır. Son olarak, yüksek frekanslardaki zayıflama, çevresel gürültünün etkisini azaltarak dinleme sırasında dikkat dağınıklığını ve hatalı algılamaları en aza indirmektedir.



Şekil 6. Stetoskop diyaframının frekans yanıtı: referans ses (20-20kHz) ve diyaframdan gelen sesin karşılaştırmalı bode diyagramı.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, stetoskop diyafram malzemesi olarak sentetik lifler yerine doğal ve sürdürülebilir bir alternatif olan kenevir kumaş bazlı kompozit malzemelerin kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Üretilen diyaframlara antibakteriyel özellik kazandırmak amacıyla borik asit ve nano TiO_2 katkıları eklenmiş ve antibakteriyel testler sonucunda borik asit katkılı numunenin Escherichia coli ve Staphylococcus aureus bakterilerine karşı etkili olduğu belirlenmiştir. Nano TiO_2 katkılı numunenin ise anlamlı bir antibakteriyel aktivite göstermediği tespit edilmiştir.

Bunun yanı sıra, kenevir bazlı stetoskop diyaframlarının frekans yanıtı Bode diyagramı ile incelenmiş ve ticari malzemelerle karşılaştırılabilir düzeyde olduğu gösterilmiştir.

Yapılan analizler, diyaframın 100 Hz - 1 kHz aralığında ses iletimini güçlendirerek akciğer seslerinin daha iyi algılanmasını sağladığını ve 20-150 Hz aralığında stabil bir yanıt sunarak kalp seslerinin net duyulmasını desteklediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, 5 kHz üzerindeki frekanslardaki zayıflama çevresel gürültüyü baskılayarak stetoskop kullanımının klinik ortamlarda daha verimli olmasına katkıda bulunmuştur.

Elde edilen sonuçlar, üretilen kenevir kumaş bazlı diyafram malzemelerinin biyolojik olarak parçalanabilir, antibakteriyel ve çevre dostu bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Sürdürülebilir malzemelerden üretilen bu malzemelerin, tıbbi cihaz üretiminde hem hijyen hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağlayabileceği düşünülmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, kenevir liflerinin farklı antibakteriyel katkılarla optimize edilmesi ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine odaklanabilir. Ayrıca, geniş kapsamlı klinik testlerle bu tür malzemelerin etkinliği ve güvenliği daha detaylı olarak değerlendirilebilir. Bu çalışma, doğal ve çevre dostu malzemelerin tıbbi cihaz üretiminde kullanım potansiyelini artırmaya yönelik önemli bir katkı sunmaktadır.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	T.M.	S.A.	Ş.E.	A.A.T.
K	25	25	25	25
T	30	20	25	25
Y	30	20	25	25
VTI	20	20	30	30
VAY	30	30	20	20
KT	20	20	30	30
YZ	30	20	25	25
KI	25	25	25	25
GR	30	30	20	20

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon.

Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

Antony S, Cherouat A, Montay G. 2018. Experimental, analytical and numerical analysis to investigate the tensile behaviour of hemp fibre yarns. Compos Struct 202: 482-490.

Bayram A, Geyik Değerli N. 2024. Kenevir kumaşından sifir atik yaklaşimi ile özgün giysi tasarimi. Turk J Fashion Des Manag 6: 121-140.

Brandt LJ. 2023. Use of the stethoscope to diagnose gastrointestinal and hepatic disorders. Am J Gastroenterol 118: 1113-1116.

Crini G, Lichtfouse E, Chanet G, Morin-Crini N. 2020. Applications

of hemp in textiles, paper industry, insulation and building materials, horticulture, animal nutrition, food and beverages, nutraceuticals, cosmetics and hygiene, medicine, agrochemistry, energy production and environment: a review. Environ Chem Lett 18: 1451-1476.

Duffy VG, (Ed.). 2015. Digital human modeling. applications in health, safety, ergonomics and risk management: Ergonomics and health. springer ınternational publishing, Cham, pp: 922.

Dwi AZ, Syamsudin H. 2021. Manufacturing of E-Glass/Epoxy composite LSU-03 Propeller Using Hand Lay-up Method. Avia 2.

Elkington M, Bloom D, Ward C, Chatzimichali A, Potter K. 2015a. Hand layup: understanding the manual process. Adv Manuf Polym Compos Sci 1: 138-151.

Elkington M, Ward C, Chatzimichali A, Potter K. 2015b. Studying effects of preshearing on hand layup. Adv Manuf Polym Compos Sci 1: 80-93.

Hou K, Xia S, Bejerano E, Wu J, Jiang Xç 2023. ARSteth: Enabling home self-screening with ar-assisted ıntelligent stethoscopes. In: The 22nd International Conference, pp: 205-218.

Khan BA, Warner P, Wang H. 2014. Antibacterial properties of hemp and other natural fibre plants: A review. BioRes 9: 3642-3659.

Malabadi RB, Kolkar KP, Chalannavar RK. 2023. Industrial Cannabis sativa: Role of hemp (fiber type) in textile industries. World J Bio Pharm Health Sci 16: 1-14.

Meers PD, Chow CK. 1990. Bacteriostatic and bactericidal actions of boric acid against bacteria and fungi commonly found in urine. J Clin Pathol 43: 484-487.

Mishra S, Tripathy SS, Misra M, Mohanty AK, Nayak SK. 2002. Novel eco-friendly biocomposites: biofiber reinforced biodegradable polyester amide composites—Fabrication and properties evaluation. J Reinf Plast Compos 21: 55-70.

Misnon MI, Islam MM, Epaarachchi JA, Lau KT, 2015. Analyses of woven hemp fabric characteristics for composite reinforcement. Mater Des 66: 82-92.

Mohanty AK, Vivekanandhan S, Pin JM, Misra M. 2018. Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations. Science 362: 536-542.

Nishino T, Hirao K, Kotera M, Nakamae K, Inagaki H. 2003. Kenaf reinforced biodegradable composite. Compos Sci Technol 63: 1281-1286.

Nowak LJ, Nowak KM. 2019. An experimental study on the role and function of the diaphragm in modern acoustic stethoscopes. Appl Acoust 155: 24-31.

Palabıyık İ, Körlü A, Özçelik Kayseri G. 2024. Kenevir içeren denim giysilerin terbiyesinde çevre dostu bir yöntem: ozon ile yıkama. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 39: 881-895.

Promhuad K, Srisa A, San H, Laorenza Y, Wongphan P, Sodsai J, Tansin K, Phromphen P, Chartvivatpornchai N, Ngoenchai P, Harnkarnsujarit N. 2022. Applications of hemp polymers and extracts in food, textile and packaging: A review. Polymers 14.

Scheibe M, Urbaniak M, Bledzki A. 2023. Application of natural (plant) fibers particularly hemp fiber as reinforcement in hybrid polymer composites - Part I. Origin of hemp and ıts coming into prominence, cultivation statistics, and Legal Regulations. J Nat Fibers 20.

Serov DA, Gritsaeva AV, Yanbaev FM, Simakin AV, Gudkov SV. 2024. Review of antimicrobial properties of titanium dioxide nanoparticles. Int J Mol Sci 25.

Vieira A, Rodríguez-Lorenzo L, Leonor IB, Reis RL, Espiña B, Dos Santos MB. 2023. Innovative antibacterial, photocatalytic, titanium dioxide microstructured surfaces based on bacterial adhesion enhancement. ACS Appl Bio Mater 6: 754-764.

Yurtalan N, Geyikçi F, Uğuz G. 2024. Effect of boric acid addition on antibacterial dye production. J Turk Chem Soc Sect B Chem Eng 7: 175-182.

Zamboulis A, Xanthopoulou E, Chrysafi I, Lorenzo C, Bikiaris DN. 2023. Poly(ethylene succinate)/hemp fiber composites: Fully biobased materials with improved thermal and biodegradation properties. Sustain Chem Environ 4: 100045.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1651121

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 837-845/ May 2025

THERMODYNAMIC AND STRUCTURAL PROPERTIES OF BIOMIMETIC MONOLAYERS CONTAINING CHOLESTEROL AND MAGNETITE NANOPARTICLES

Nagihan SOYER[1]*, Sema SALGIN[1], Uğur SALGIN[1]

[1]*Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, 58140, Sivas, Türkiye*

Abstract: The thermodynamic and structural properties of biomimetic monolayers composed of cholesterol, dipalmitoylphosphatidylcholine, and hydrophobic magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles were investigated under varying cholesterol molar fractions and pH conditions (4.8 and 7.4). Langmuir monolayer experiments were performed to analyze surface pressure-area isotherms, excess molecular area, excess Gibbs free energy of mixing, and compressibility modulus to assess lipid monolayer phase behavior, molecular organization, and mechanical stability. The results confirm that cholesterol enhances monolayer condensation up to a cholesterol molar fraction of 0.50, particularly at pH 7.4, where stronger lipid-lipid interactions promote molecular ordering and increase monolayer rigidity. At cholesterol molar fractions of 0.75 and higher, steric hindrance and phase separation effects emerge, disrupting monolayer homogeneity. pH significantly influences monolayer stability, with pH 7.4 favoring lipid condensation, whereas pH 4.8 induces monolayer expansion and molecular disorder. Excess molecular area and Gibbs free energy of mixing analyses indicate the strongest cholesterol-lipid interactions at a cholesterol molar fraction of 0.25 for pH 4.8 and 0.50 for pH 7.4, confirming these compositions as the most thermodynamically stable. Compressibility modulus analysis demonstrates that cholesterol enhances monolayer rigidity, with pH 7.4 producing higher values. However, at high cholesterol molar fractions, compressibility modules slightly decrease, suggesting steric constraints and lateral phase separation. The incorporation of magnetite nanoparticles increases molecular area and slightly reduces monolayer rigidity at low cholesterol molar fractions due to steric disruptions, but at cholesterol molar fractions of 0.50 and higher, cholesterol stabilizes the monolayer, counteracting nanoparticle-induced perturbations. These findings provide insight into the thermodynamic and structural regulation of biomimetic lipid monolayers by cholesterol and magnetite nanoparticles, with implications for nanomedicine, membrane biophysics, and lipid-based nanostructures.

Keywords: Cholesterol, Dipalmitoylphosphatidylcholine, Hydrophobic Magnetite nanoparticles, Monolayer stability, Surface pressure, Phase behavior

***Corresponding author:** Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, 58140, Sivas, Türkiye
E mail: nsoyer@cumhuriyet.edu.tr (N. SOYER)
Nagihan SOYER https://orcid.org/0000-0003-1342-2037
Sema SALGIN https://orcid.org/0000-0001-6354-3553
Uğur SALGIN https://orcid.org/0000-0002-5683-7569

Received: March 05, 2025
Accepted: April 09, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Soyer N, Salgın S, Salgın U. 2025. Thermodynamic and structural properties of biomimetic monolayers containing cholesterol and magnetite nanoparticles. BSJ Eng Sci, 8(3): 837-845.

1. Introduction

Cell membranes play a fundamental role in regulating biological processes, including molecular transport, signal transduction, and structural organization. Their biophysical properties are largely governed by the interplay between lipid composition, phase behavior, and environmental conditions (Jurak et al., 2018). Among the key lipid components, dipalmitoylphosphatidylcholine (DPPC), a major phospholipid in cell membranes and pulmonary surfactants, is well known for its thermotropic phase transitions, shifting between gel, liquid-expanded (LE), and liquid-condensed (LC) phases depending on temperature and molecular interactions (Ding et al., 2016; Zhang et al., 2016). Cholesterol (Chol), another critical membrane component, interacts with phospholipids to modulate bilayer rigidity, lipid domain formation, and phase stability (Rosilio, 2017). The specific interactions between Chol and DPPC significantly affect membrane permeability and mechanical properties, making this system a widely used model in biomembrane research (Oliveira et al., 2022). To investigate the phase behavior of lipid assemblies under controlled conditions, Langmuir monolayers have emerged as a powerful model system. These monolayers allow for precise control over lipid composition, surface pressure (π), and molecular organization, thereby enabling systematic studies of lipid-lipid and lipid-nanoparticle interactions (Moya Betancourt et al., 2023; Swierczewski and Bürgi, 2023). The incorporation of nanoparticles (NPs) into biomimetic membranes has drawn increasing interest due to their applications in biosensing, targeted drug delivery, and nanomedicine (Piosik et al., 2021; Peetla et al., 2014). Magnetic Fe_3O_4 nanoparticles (MNPs) are promising candidates in biomedicine due to their superparamagnetic properties, biocompatibility, and surface functionalization potential (Hao et al., 2016; Salas et al., 2024). Previous studies suggest that MNPs alter lipid monolayer structure,

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

leading to changes in lipid packing, phase behavior, and membrane elasticity, but the combined effects of cholesterol, pH, and MNPs remain underexplored (Rosilio, 2017). Recent research has demonstrated that pH plays a crucial role in determining lipid monolayer stability and molecular organization. Under acidic conditions (pH 4.8), intermolecular interactions between DPPC molecules are strengthened, leading to higher packing densities and lower molecular mobility (Ding et al., 2016; Zhang et al., 2016). Conversely, neutral pH (pH 7.4) promotes a more fluid monolayer structure, reducing lipid-lipid interactions and favoring molecular expansion (Cullis et al., 1997). These pH-dependent behaviors are particularly relevant in biological systems, where lipid membranes are exposed to varying pH environments, such as extracellular fluids (pH ~7.4) and endosomal compartments (pH ~4.8 - 5.5) (He et al., 2014). Additionally, pH-driven alterations in lipid monolayers influence nanoparticle adsorption, Chol miscibility, and lipid domain formation, further highlighting the need for systematic investigations (Rosilio, 2017). This study aims to systematically investigate the interdependent effects of x_{Chol}, pH, and Fe_3O_4 MNPs on lipid monolayer phase behavior, thermodynamic properties, and mechanical stability. Surface pressure-area isotherms, excess molecular area, excess Gibbs free energy of mixing, and compressibility modulus were analyzed to quantify these effects across varying x_{Chol} and pH conditions. By providing a comprehensive assessment of these parameters, this research advances our understanding of lipid-nanoparticle interactions, biomimetic membrane stability, and nanostructured lipid platforms for drug delivery applications.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

The biomimetic membrane model components, including DPPC and Chol, were purchased from Avanti Polar Lipids Inc. (USA). Hydrophobic Fe_3O_4 MNPs (≤5 nm), anhydrous chloroform, anhydrous methanol, and sodium phosphate salts were obtained from Sigma-Aldrich (Germany). Ultrapure water (conductivity: 18.2 MΩ cm) from a Milli-Q system (Millipore) was used for solution preparation and the cleaning of the Langmuir-Blodgett (LB) trough, ensuring contaminant removal and maintaining experimental precision.

2.2. Langmuir Monolayer Experiments

Chol/DPPC-MNP monolayers were prepared using a Langmuir-Blodgett trough (KSV NIMA 2000, KSV Instruments Ltd., Helsinki, Finland) with a surface area of 273 cm^2. The system was equipped with movable Delrin barriers, a Wilhelmy plate for surface pressure measurements, and an electronic balance with a resolution of 4 μN/m. The trough and barriers were made of Teflon, ensuring chemical resistance and minimal contamination.

The surface pressure (π) was measured using the Wilhelmy plate method and was calculated according to equation 1:

$$\pi = \gamma_{0-}\gamma \quad (1)$$

where γ_0 represents the surface tension of the subphase in the absence of a monolayer, and γ corresponds to the surface tension measured when the monolayer is present (Wrobel et al., 2024; Szcześ et al., 2012).

Prior to each experiment, the main components of the system, including the trough and Teflon barriers, were thoroughly cleaned with chloroform, methanol, and ultrapure water to eliminate contaminants. The subphase for Chol/DPPC-MNP monolayers consisted of 176 mL sodium phosphate buffer solutions at pH 4.8 and 7.4 to evaluate the impact of pH on lipid-nanoparticle interactions. The compression isotherms were obtained at a controlled temperature of 24 ± 0.1°C using a refrigerated circulator (Haake C25P Phoenix II, ThermoElectron Co., USA) to ensure stable monolayer conditions. Surface pressure-area (π-A) isotherms were recorded to investigate the interaction of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles with phospholipid monolayers, simulating biomimetic membrane behavior. The Chol/DPPC-MNP stock solutions (1 mg/mL) were prepared in anhydrous chloroform at varying chol mole fractions (x_{Chol}=0, 0.25, 0.5, 0.75, and 1.0). For each experiment, 25 μL of the solution was spread onto the subphase surface using a Hamilton micro syringe. The system was allowed to equilibrate for 15 minutes to ensure complete solvent evaporation. All isotherms were obtained under symmetric compression of the monolayers at a constant barrier speed of 5 mm/min, with measurements recorded automatically. Each experiment was performed in triplicate to ensure reproducibility.

2.3. Calculation of Thermodynamic and Structural Parameter

Mean Molecular Area (A_{12})

The mean molecular area, A_{12}, was determined from π-A isotherms using equation 2:

$$A_{12} = \frac{A_{measured}}{N} \quad (2)$$

where A_{12} represents the mean molecular area (Å^2/molecule), $A_{measured}$ is the total monolayer area at a given surface pressure (Å^2), and N is the number of lipid molecules at the interface.

Excess Molecular Area (A_{exc})

The excess molecular area, which quantifies deviations from ideal mixing, was calculated using equation 3:

$$A_{exc} = A_{12}^{real} - A_{12}^{ideal} \quad (3)$$

where A_{12}^{real} is the experimentally measured molecular area, and A_{12}^{ideal} is the theoretical molecular area assuming ideal mixing, determined by equation 4:

$$A_{12}^{ideal} = x_1 A_1 + x_2 A_2 \quad (4)$$

Here, x_1 and x_2 are the mole fractions of lipid

components, and A_1 and A_2 are their respective molecular areas in pure form.

Excess Gibbs Free Energy of Mixing (ΔG_{exc})

The thermodynamic stability of the monolayer was assessed using the excess Gibbs free energy of mixing, ΔG_{exc}, given by equation 5:

$$\Delta G_{exc} = N_A \int_0^{\pi} A_{exc}\, d\pi \tag{5}$$

where ΔG_{exc} (J/mol) represents the excess free energy of mixing, N_A is Avogadro's number, A_{exc} is the excess molecular area, and π is the surface pressure (mN/m). Negative values of ΔG_{exc} indicate favorable lipid-Chol interactions, while positive values suggest phase separation.

Compressibility Modulus (C_s^{-1})

The compressibility modulus, C_s^{-1}, which describes the elasticity of the monolayer, was determined from the π-A isotherm using equation 6:

$$C_s^{-1} = -A\left(\frac{\partial \pi}{\partial A}\right)_T \tag{6}$$

where C_s^{-1} (mN/m) represents the compressibility modulus, A is the molecular area (Å²/molecule), and $(d\pi/dA)_T$ is the derivative of surface pressure with respect to molecular area at constant temperature. Higher C_s^{-1} values indicate a more rigid monolayer, while lower values correspond to a more fluid monolayer.

3. Results and Discussion

3.1. Surface Pressure-Area Isotherms

The π-A isotherms provide critical insights into the phase behavior, molecular organization, and thermodynamic stability of Chol/DPPC monolayers incorporating hydrophobic MNPs. The isotherms were recorded at varying x_{Chol} (0, 0.25, 0.5, 0.75, and 1.0) and pH conditions (4.8 and 7.4), allowing for the evaluation of how Chol and pH modulate lipid packing and phase transitions in the presence of MNPs (Moya Betancourt et al., 2023; Szcześ et al., 2012). The π was determined experimentally using the Wilhelmy plate method and calculated using equation 1. This equation was used to compute the real-time variations in π during monolayer compression, generating the π-A isotherms that describe the monolayer's phase behavior under different Chol and pH conditions. As shown in Figure 1, at low x_{Chol} (≤0.25), the isotherms exhibit a LE to LC phase transition plateau between ~10-12 mN/m, indicating the coexistence of different molecular packing states within the monolayer. However, as x_{Chol} increases, the LE-LC transition gradually disappears, and the isotherms shift to smaller molecular areas, suggesting that Chol promotes lipid condensation and enhances molecular ordering (Cullis et al., 1997; Rosilio, 2017). At higher cholesterol concentrations (x_{Chol}≥0.5), the phase transition plateaus disappear entirely, leading to a more homogeneous and rigid monolayer structure. The collapse pressure (π_a), which defines the maximum surface pressure before monolayer failure, increases from ~42 mN/m at x_{Chol}=0 to ~55 mN/m at x_{Chol}=1.0, confirming the stabilizing effect of Chol in the presence of MNPs (Moya Betancourt et al., 2023; Ganta et al., 2008).

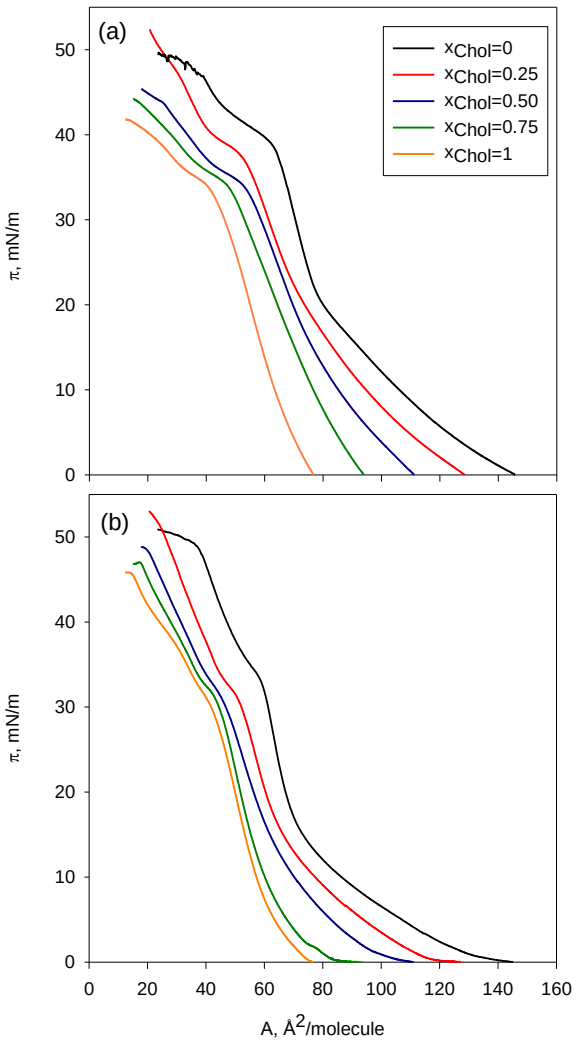


Figure 1. π-A isotherms obtained at different composition ratios of Chol/DPPC-MNP at (a) pH=4.8 and (b) pH=7.4.

The pH-dependent effects on monolayer behavior are evident in Figure 1, where monolayers at pH 4.8 (Figure 1a) exhibit larger molecular areas at a given π compared to pH 7.4 (Figure 1b), suggesting that acidic conditions weaken lipid-lipid interactions and reduce lipid packing efficiency. This expansion can be attributed to the protonation of DPPC phosphate headgroups at pH 4.8, which reduces electrostatic interactions, increasing intermolecular repulsion and promoting molecular disorder. As a result, Chol-lipid interactions are less pronounced under acidic conditions, leading to a more expanded monolayer structure (Ding et al., 2016; Gong et al., 2002). This effect is particularly pronounced at high x_{Chol} (≥0.5), where the molecular area at π=30 mN/m is ~40 Å²/molecule at pH 7.4, compared to ~55 Å²/molecule at pH 4.8, confirming that Chol integrates more efficiently into the monolayer at neutral pH. Figure

1 further confirms that the collapse pressure at pH 7.4 is consistently higher (~5-8 mN/m) than at pH 4.8, supporting the idea that pH modulates monolayer stability by altering lipid headgroup interactions. These findings align with previous studies, such as Gao et al. (2010), which highlight the role of pH-responsive nanoparticles in altering surface charge and molecular organization. Specifically, at lower pH levels, nanoparticles undergo swelling or charge modification, which may further influence monolayer expansion and disrupt lipid packing. This suggests that the observed increase in molecular area at acidic pH could be partially attributed to pH-dependent NP structural changes rather than solely lipid headgroup protonation. Since MNPs were incorporated in all experimental conditions, their effects must be evaluated alongside Chol and pH effects rather than as an independent variable. The presence of MNPs results in an overall monolayer expansion, as evidenced by the increased molecular area at a given π compared to Chol-DPPC systems without nanoparticles. Previous research (Bodik et al., 2020) indicates that the organization of nanomaterials within Langmuir monolayers is highly dependent on pH-controlled surface potential changes. However, at $x_{Chol} \geq 0.5$, the stabilizing effect of Chol counteracts this expansion, limiting MNP-induced disruptions in monolayer packing (Oliveira et al., 2022; Piosik et al., 2021). Moreover, the Langmuir monolayer stability is further confirmed by the collapse pressure values obtained for all Chol molar fractions. As shown in Figure 1, a single collapse pressure value is observed across all compositions, which, as noted by Jurak et al. (2018), indicates that the monolayer components are miscible. This suggests that Chol, DPPC, and MNPs form a stable monolayer structure without phase separation at all studied concentrations. Additionally, the absence of collapse up to approximately 46-48 mN/m surface pressure further confirms the successful formation of the Langmuir monolayers. This effect is particularly evident at pH 7.4, where enhanced lipid-lipid and lipid-Chol interactions contribute to monolayer stability.

3.2. Molecular Area Reduction and Lipid Mixing Behavior

The A_{12}-x_{Chol} analysis provides insight into how Chol influences the packing behavior of DPPC monolayers incorporating MNPs under different π and pH conditions (4.8 and 7.4) (Figure 2). This analysis helps determine whether Chol acts as a condensing agent by reducing A_{12} or whether it disrupts lipid organization at different compositions. The A_{12} values were determined experimentally from π-A isotherms and plotted as a function of x_{Chol}. The theoretical molecular area for an ideal mixture was calculated using equation 4), where component 1 (DPPC) and component 2 (Chol) denote the molar fractions and their respective molecular areas in pure monolayers. As shown in Figure 2, A_{12} values decrease progressively with increasing x_{Chol}, indicating that Chol enhances molecular condensation and lipid ordering (Moya Betancourt et al., 2023; Szcześ et al., 2012). Figure 2(a) illustrates that at pH 4.8, A_{12} values remain consistently larger compared to Figure 2(b) at pH 7.4, supporting the idea that acidic conditions weaken lipid-lipid interactions and promote a more expanded monolayer (Ding et al., 2016; Gong et al., 2002). In contrast, at pH 7.4, stronger Chol-lipid interactions result in a more condensed lipid organization.

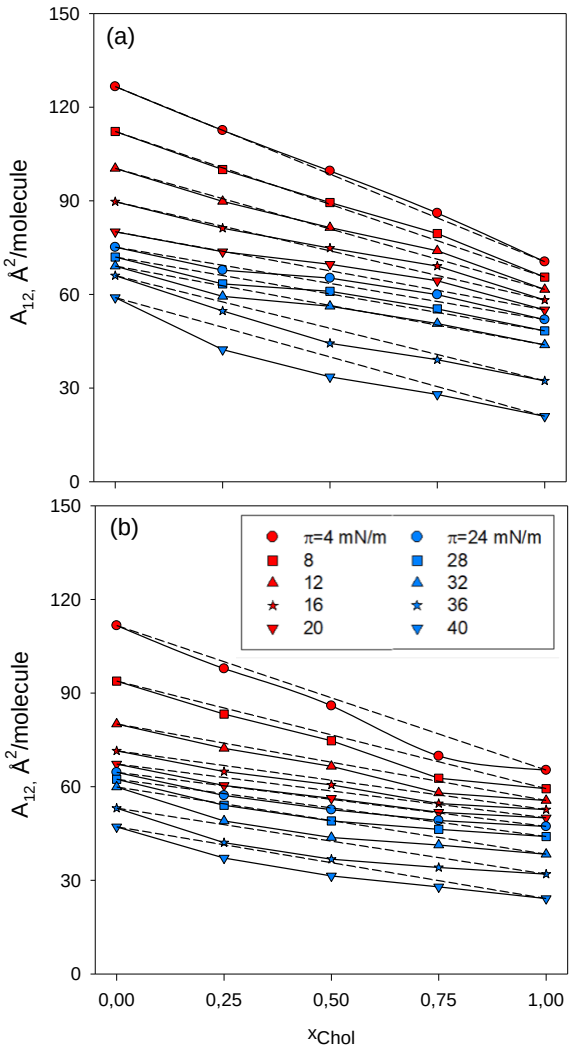


Figure 2. A_{12}-x_{Chol} curves obtained at different surface pressures for Chol/DPPC-MNP monolayers at (a) pH=4.8 and (b) pH=7.4.

A theoretical ideal mixture would exhibit a linear A_{12}-x_{Chol} curve, which indicates that the individual monolayer components do not interact and are not miscible (Dana, 1999). However, experimental A_{12}-x_{Chol} values deviate from this linear behavior, demonstrating that Chol, DPPC, and MNPs are interacting and forming a stable mixed monolayer. As shown in Figure 2, the experimental and theoretical A_{12}-x_{Chol} curves do not overlap, which is a direct result of intercomponent interactions and confirms the miscibility of Chol/DPPC-MNP monolayers. This deviation from ideality indicates that Chol and MNPs influence lipid organization, reinforcing lipid-lipid

interactions at specific compositions. The data indicates that at low x_{Chol} (≤0.25), the A_{12} decreases gradually, suggesting that Chol is integrating into the monolayer while still allowing some lipid-lipid spacing. However, at x_{Chol}≥0.5, A_{12} decreases more sharply, confirming that Chol enhances molecular condensation and promotes a more tightly packed lipid organization (Cullis et al., 1997; Rosilio, 2017). As seen in Figure 2, at higher surface pressures (π≥28 mN/m), the molecular area decreases more significantly, indicating stronger molecular condensation and increased monolayer stability. A significant pH-dependent effect is observed, where A_{12} values at pH 4.8 are consistently higher than at pH 7.4. This suggests that acidic conditions weaken lipid-lipid interactions, leading to more expanded monolayers, whereas neutral pH promotes stronger Chol-lipid interactions, resulting in denser packing. Additionally, Figure 2 illustrates that higher surface pressures result in stronger molecular condensation, confirming that Chol stabilizes the monolayer by increasing its resistance to compression (Moya Betancourt et al., 2023; Szcześ et al., 2012). Since MNPs are present in all conditions, their effect on molecular areas must be considered alongside Chol and pH effects. The data suggest that at low x_{Chol}, A_{12} values remain larger due to steric hindrance induced by MNPs (Oliveira et al., 2022; Piosik et al., 2021). However, at x_{Chol} ≥ 0.5, Chol overcomes this effect, promoting lipid packing despite the presence of nanoparticles. The observation that π values decrease with increasing x_{Chol} further supports the idea that Chol modulates the interaction between monolayer components, altering the packing density and fluidity of the monolayer. These findings confirm that Chol enhances lipid condensation up to x_{Chol}≈0.5, particularly at higher π values and pH 7.4, whereas at pH 4.8, the monolayer remains slightly expanded, reflecting weaker lipid cohesion.

3.3. Deviations from Ideal Mixing: Excess Molecular Area Analysis

The A_{exc} provides a more detailed understanding of whether Chol and DPPC form an ideal or non-ideal mixture in the presence of MNPs. Negative A_{exc} values indicate that the system favors condensation (strong lipid-Chol interactions), whereas positive values suggest molecular expansion (weaker lipid interactions or phase separation tendencies) (Figure 3). The A_{exc} values were calculated using equation 3), where A_{12}^{real} represents the experimentally determined molecular area, while A_{12}^{ideal} is obtained assuming ideal mixing based on equation 4). As shown in Figure 3, at low x_{Chol} (≤0.25), A_{exc} values remain close to zero or slightly positive, suggesting that Chol initially integrates into the DPPC monolayer with minimal disruption. However, as x_{Chol} increases toward 0.25-0.50, A_{exc} becomes more negative (~ -6 to -8 Å^2/molecule at pH 7.4), indicating that Chol promotes molecular condensation and enhances lipid-lipid interactions (Moya Betancourt et al., 2023; Szcześ et al., 2012). Figure 3(a) illustrates that at pH 4.8, weaker electrostatic interactions result in less pronounced condensation effects, while Figure 3(b) confirms that at pH 7.4, A_{exc} reaches its most negative values, suggesting stronger Chol-DPPC interactions (Ding et al., 2016; Gong et al., 2002).

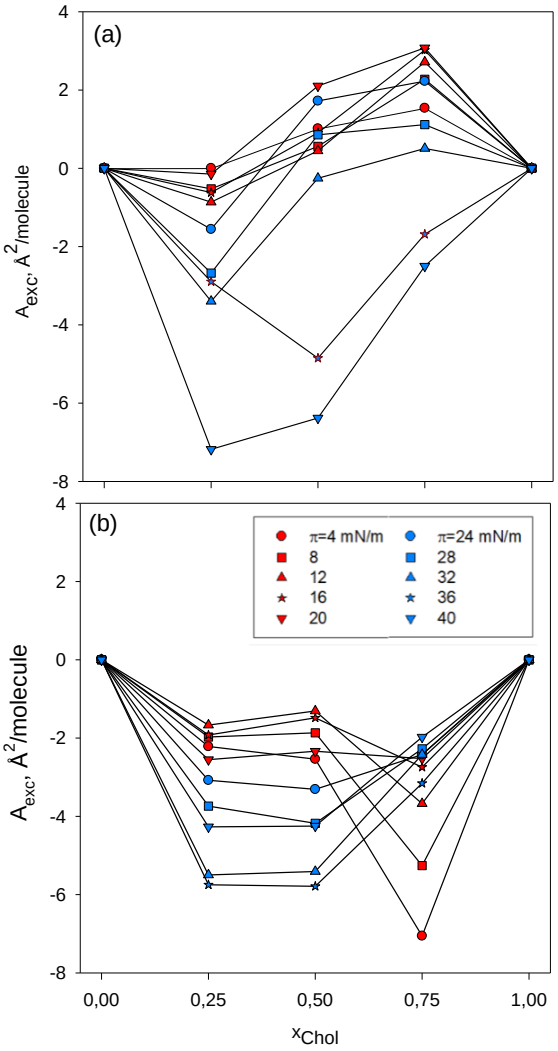


Figure 3. A_{exc}-x_{Chol} curves obtained at different surface pressures for Chol/DPPC-MNP monolayers at (a) pH=4.8 and (b) pH=7.4.

A strong pH-dependent effect is evident, where A_{exc} values at pH 7.4 reach more negative values compared to pH 4.8. This suggests that neutral pH facilitates stronger Chol-DPPC interactions, favoring more efficient molecular packing, while at pH 4.8, weaker electrostatic interactions between lipid headgroups lead to a less pronounced condensation effect. The most negative A_{exc} values, indicating the highest molecular attraction and optimal lipid condensation, were observed at x_{Chol} = 0.25 for pH 4.8 and x_{Chol}=0.50 for pH 7.4, as seen in Figure 3. These compositions represent the most thermodynamically stable conditions for each pH level (Jurak et al., 2018). At pH 4.8, the most negative A_{exc} value is observed at x_{Chol}=0.25, while at pH 7.4, it occurs at x_{Chol}=0.50. This difference arises because at pH 4.8, the increased protonation of DPPC headgroups weakens electrostatic attraction, making lower Chol

concentrations (x_{Chol}=0.25) more favorable for lipid condensation. Conversely, at pH 7.4, reduced protonation allows Chol to integrate more effectively into the monolayer, leading to maximum condensation at x_{Chol} = 0.50. Although x_{Chol}=0.75 contains a higher Chol fraction, A_{exc} begins to increase again at this concentration, suggesting that excessive Chol disrupts uniform lipid packing and induces steric hindrance effects rather than further enhancing molecular condensation. These conditions correspond to the most efficient molecular packing, strongest lipid-Chol interactions, and the most thermodynamically stable monolayer structures. Since MNPs were present in all experimental conditions, their impact on non-ideal mixing must be considered. The presence of MNPs slightly increases A_{exc} values at low x_{Chol}, suggesting that nanoparticle-lipid interactions introduce steric constraints that counteract Chol condensation effect. However, at x_{Chol}≈0.25-0.50, the stabilizing effect of Chol dominates, leading to the most negative A_{exc} values, confirming that this composition represents the optimal Chol-DPPC interaction state. These results confirm that Chol enhances lipid condensation up to x_{Chol}≈0.50, particularly at pH 7.4, while higher x_{Chol} levels lead to steric effects and phase separation tendencies. The data also highlights a competitive relationship between Chol and MNPs, where Chol stabilizes lipid packing and reduces nanoparticle-induced perturbations. The interpretation of A_{exc} values further supports that when A_{exc} is positive (experimental values > theoretical values), the system is not fully miscible, and repulsive intermolecular forces dominate. Conversely, when A_{exc} is negative (experimental values < theoretical values), the system is fully miscible, and attractive intermolecular forces dominate (He et al., 2014; Jurak et al., 2018). The most negative A_{exc} values indicate the strongest intermolecular attraction, leading to the highest molecular packing efficiency. Thus, the system reaches its highest molecular attraction, miscibility, and packing efficiency when A_{exc} reaches its most negative values: at x_{Chol}=0.25 for pH 4.8 and x_{Chol}=0.50 for pH 7.4. Under these conditions, the system exhibits the strongest lipid-Chol interactions, optimal lipid condensation, and the most thermodynamically stable monolayer structure.

3.4. Thermodynamic Stability: Excess Gibbs Free Energy of Mixing Analysis

The ΔG_{exc} of mixing provides insights into the thermodynamic stability of Chol/DPPC monolayers in the presence of MNPs. By evaluating deviations from ideal mixing, ΔG_{exc} helps determine whether the system exhibits homogeneous mixing, enhanced lipid-lipid interactions, or phase separation tendencies. A negative ΔG_{exc} value indicates thermodynamically favorable lipid mixing and strong molecular interactions, whereas positive values suggest phase separation or repulsive interactions between the components. The ΔG_{exc} values were determined using equation 5) and analyzed under different surface pressures and pH conditions. As shown in Figure 4, at low x_{Chol} (≤0.25), ΔG_{exc} values are close to zero or slightly negative, suggesting that Chol initially integrates into the DPPC monolayer without significantly altering its thermodynamic stability. However, as x_{Chol} increases toward 0.50, ΔG_{exc} reaches its most negative value (~ -750 J/mol at pH 4.8 and ~ -900 J/mol at pH 7.4), confirming that Chol enhances lipid-lipid interactions and promotes thermodynamically favorable mixing at this composition (Moya Betancourt et al., 2023; Szcześ et al., 2012). Figure 4(a) illustrates that at pH 4.8, weaker electrostatic interactions result in reduced thermodynamic stability, while Figure 4(b) confirms that at pH 7.4, ΔG_{exc} reaches its most negative values, suggesting stronger Chol-DPPC interactions (Ding et al., 2016; Gong et al., 2002).

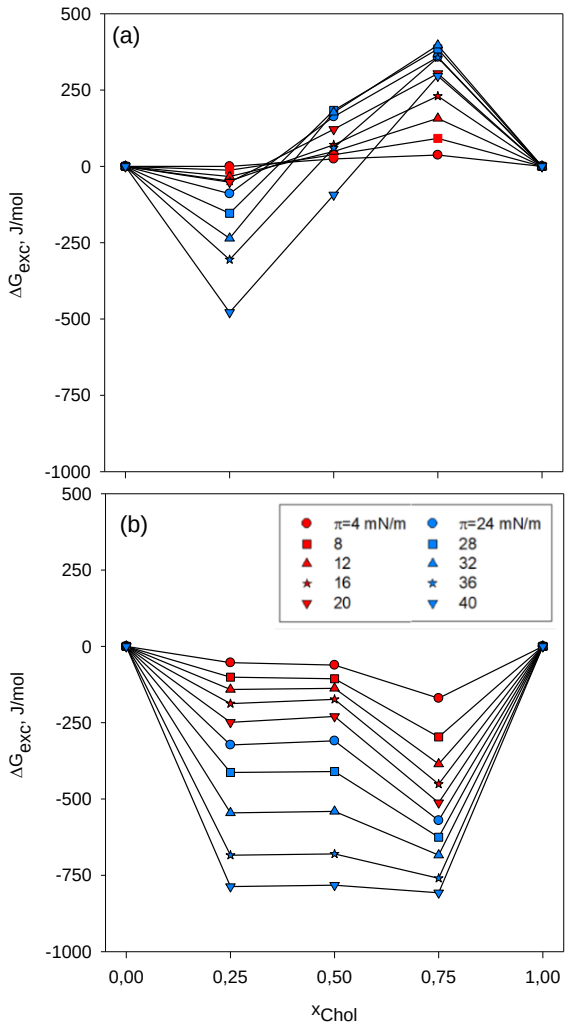


Figure 4. ΔG_{exc}-x_{Chol} curves obtained at different surface pressures for Chol/DPPC-MNP monolayers at (a) pH=4.8 and (b) pH=7.4.

The effect of pH is significant, as ΔG_{exc} values are consistently lower at pH 7.4 compared to pH 4.8, indicating that Chol incorporation into the monolayer is more thermodynamically stable at neutral pH. This trend supports the hypothesis that reduced electrostatic repulsion at pH 7.4 enhances lipid-Chol interactions,

increasing monolayer stability. At pH 4.8, ΔG_{exc} values are less negative, suggesting that protonation of DPPC headgroups weakens Chol-induced stabilization, resulting in reduced lipid miscibility and a higher tendency for phase separation. As seen in Figure 4, at $x_{Chol} \geq 0.50$, ΔG_{exc} values increase toward zero, and at x_{Chol} = 1.0, ΔG_{exc} becomes slightly positive (~ +50 to +150 J/mol at pH 4.8), indicating that excess Chol disrupts monolayer homogeneity, leading to steric hindrance and phase separation tendencies (Oliveira et al., 2022; Piosik et al., 2021). These findings suggest competitive interaction between Chol and MNPs, where Chol enhances monolayer stability by promoting lipid ordering and reducing nanoparticle-induced disruptions. However, at high x_{Chol}, steric effects and phase separation tendencies begin to dominate, reducing thermodynamic stability. The results confirm that Chol concentration and pH are key regulators of monolayer stability, influencing lipid-lipid interactions, nanoparticle incorporation, and phase behavior. ΔG_{exc} is an important indicator of monolayer miscibility and stability. When ΔG_{exc} =0, the system behaves ideally, meaning that molecular interactions are balanced, and the components are completely miscible. If ΔG_{exc} is negative, attractive forces dominate, leading to a more stable and condensed monolayer. Conversely, if ΔG_{exc} is positive, repulsive interactions become dominant, increasing the likelihood of phase separation (Szcześ et al., 2012; He et al., 2014; Jurak et al., 2018; Vázquez-González et al., 2019). At pH 4.8, the most negative ΔG_{exc} value occurs at x_{Chol}=0.25, confirming that at this composition, attractive forces dominate, and the monolayer is at its most thermodynamically stable state. Similarly, at pH 7.4, the most negative ΔG_{exc} value is observed at x_{Chol}=0.50, indicating that this composition provides the optimal balance between lipid-Chol interactions and monolayer stabilization. These findings agree with the A_{exc} analysis, where the strongest molecular interactions were also observed at x_{Chol}=0.25 for pH 4.8 and x_{Chol}=0.50 for pH 7.4. The negative ΔG_{exc} values further confirm that attractive forces (adhesion) are dominant in these conditions, supporting the hypothesis that Chol enhances lipid packing and monolayer integrity (Oliveira et al., 2022). Although pH 7.4 shows entirely negative ΔG_{exc} values across all compositions, indicating that attractive interactions are dominant at all Chol concentrations, pH 4.8 exhibits negative ΔG_{exc} values only at x_{Chol}=0.25, while other compositions tend toward zero or positive values, signifying the increasing role of repulsive forces. This demonstrates that lipid miscibility and monolayer stability are strongly pH-dependent, with pH 7.4 providing overall greater thermodynamic stability.

3.5. Monolayer Elasticity: Compressibility Modulus Analysis

The C_s^{-1} is a critical parameter that reflects the mechanical stability and elasticity of lipid monolayers, providing insights into how Chol and MNPs influence lipid packing under compression. Higher C_s^{-1} values indicate greater monolayer rigidity and stronger molecular interactions, whereas lower values suggest a more fluid and disordered system. The C_s^{-1} values were analyzed under different surface pressures, pH conditions (4.8 and 7.4), and x_{Chol} compositions (0, 0.25, 0.50, 0.75, and 1.0) to evaluate their impact on monolayer mechanics (Figure 5). The values were determined using equation 6). As shown in Figure 5, C_s^{-1} increases with x_{Chol}, confirming that Chol enhances monolayer rigidity by promoting lipid ordering and reducing molecular free volume. At $x_{Chol} \leq 0.25$, C_s^{-1} remains relatively low (~80-100 mN/m), reflecting a more fluid monolayer with greater molecular disorder. However, as x_{Chol} increases, C_s^{-1} rises significantly, reaching ~90-100 mN/m at $x_{Chol} \approx 0.50$-0.75, suggesting that Chol promotes tighter molecular packing and enhances monolayer stiffness (Szcześ et al., 2012; Moya Betancourt et al., 2023). At x_{Chol}=1.0, C_s^{-1} slightly decreases (~70-80 mN/m), indicating that excessive Chol may lead to lateral phase separation and reduce monolayer homogeneity.

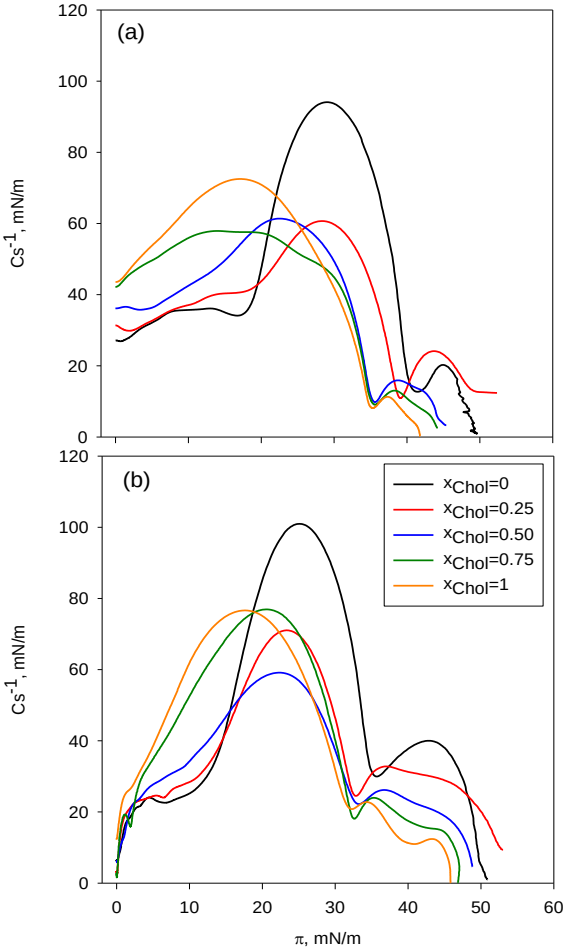


Figure 5. C_s^{-1}-π curves obtained at different composition ratios of Chol/DPPC-MNP at (a) pH=4.8 and (b) pH=7.4.

The pH effect is also evident, as monolayers at pH 7.4 exhibit consistently higher C_s^{-1} values than those at pH 4.8. At neutral pH, stronger lipid-lipid and Chol-DPPC interactions enhance monolayer stability, leading to

higher C_s^{-1} values. In contrast, at pH 4.8, C_s^{-1} values (~15-30% lower than at pH 7.4) indicate increased molecular disorder and reduced lipid packing efficiency, likely due to weaker electrostatic interactions among protonated DPPC headgroups. The realistic lateral pressure range for cell membranes (30-35 mN/m) shows that C_s^{-1} decreases with increasing x_{Chol}, indicating that higher Chol concentrations or reduced DPPC content led to a more compressible monolayer. This is expected, as DPPC has a denser structure compared to Chol, contributing to greater monolayer rigidity at lower x_{Chol} values (Marsh, 1996; Torrano et al., 2013; Jurak et al., 2018; Oliveira et al., 2022). These findings agree with Jurak (2013), who demonstrated that cholesterol enhances lipid ordering and reduces molecular free volume, increasing monolayer stiffness at moderate concentrations. At pH 4.8, the highest C_s^{-1} values are observed at x_{Chol}=0.25, indicating that at this composition, the monolayer reaches maximum rigidity under acidic conditions. However, at pH 7.4, C_s^{-1} is highest at x_{Chol}=0.50, confirming that this composition provides optimal lipid packing stability at neutral pH. These findings are consistent with Jurak (2013), who reported that at intermediate cholesterol levels, lipid condensation and molecular packing efficiency are maximized. Furthermore, this trend aligns with thermodynamic stability results from the A_{exc} and ΔG_{exc} analyses, where the strongest molecular interactions were observed at x_{Chol}=0.25 for pH 4.8 and x_{Chol}=0.50 for pH 7.4. The agreement between compressibility modulus and thermodynamic stability trends further confirms that cholesterol plays a key role in regulating lipid monolayer mechanics. At high x_{Chol} values (≥0.75), C_s^{-1} slightly decreases, which suggests steric hindrance and potential lipid domain formation at excessive Chol concentrations. This is consistent with previous studies indicating that high cholesterol levels can lead to lateral phase separation, where Chol-enriched domains disrupt uniform lipid packing, reducing monolayer stiffness (Jurak, 2013). This trend is further supported by ΔG_{exc} results, where the system shows reduced thermodynamic stability at high x_{Chol} due to steric effects and phase segregation. Since MNPs were incorporated in all experiments, their influence must be evaluated in conjunction with Chol and pH effects. As illustrated in Figure 5, at low x_{Chol}, MNP-induced structural disruptions reduce C_s^{-1} values. However, at x_{Chol}≈0.50, the stabilizing effect of Chol dominates, maintaining high C_s^{-1} values and counteracting the destabilizing influence of MNPs (Szcześ et al., 2012; Moya Betancourt et al., 2023). These results confirm that Chol and pH are key regulators of monolayer mechanical properties, with Chol enhancing monolayer elasticity at intermediate x_{Chol} values and pH 7.4 providing additional stabilization. The interplay between lipid-lipid interactions, nanoparticle incorporation, and Chol concentration ultimately determines monolayer rigidity, influencing the overall mechanical behavior of biomimetic membranes.

4. Conclusion

This study investigated the phase behavior, molecular organization, and thermodynamic properties of Chol/DPPC monolayers incorporating hydrophobic MNPs under varying x_{Chol} and pH conditions (4.8 and 7.4), providing critical insights into how these factors influence lipid monolayer stability, molecular packing, and mechanical properties. The π-A isotherm analysis confirmed that Chol enhances monolayer condensation up to x_{Chol}≈0.50, particularly at higher surface pressures and pH 7.4, whereas pH 4.8 resulted in more expanded monolayers due to weaker lipid-lipid interactions. The A_{12}-x_{Chol} analysis demonstrated that Chol reduces molecular area in a non-linear manner, with the most pronounced condensation effect observed at intermediate x_{Chol} values, beyond which steric hindrance and phase separation tendencies emerged. The A_{exc} analysis revealed deviations from ideal mixing, where negative A_{exc} values at x_{Chol}=0.25 (pH 4.8) and x_{Chol}=0.50 (pH 7.4) indicated strong Chol-lipid interactions and optimal lipid condensation, while higher x_{Chol} values led to steric constraints and non-ideal mixing effects. The excess ΔG_{exc} of mixing analysis confirmed that Chol enhances monolayer thermodynamic stability up to x_{Chol}=0.50 at pH 7.4, whereas at pH 4.8, x_{Chol}=0.25 represented the most stable composition, after which phase separation effects and steric hindrance from excess Chol molecules became dominant. The C_s^{-1} analysis demonstrated that Chol increases monolayer rigidity, with higher C_s^{-1} values at pH 7.4 indicating a mechanically more stable monolayer, while at high x_{Chol} (≥0.75), C_s^{-1} slightly decreased, suggesting steric hindrance and lateral phase separation effects. The presence of MNPs resulted in increased molecular area and slightly reduced C_s^{-1} values at low x_{Chol}, indicating steric effects that disrupted lipid packing; however, at x_{Chol}≥0.50, Chol stabilizing role counteracted these nanoparticle-induced perturbations, maintaining monolayer integrity and rigidity. These findings confirm that Chol regulates lipid packing, phase transitions, and thermodynamic stability, while pH influences lipid-lipid interactions and MNPs introduce steric modifications to the monolayer structure, demonstrating the strong correlation between C_s^{-1}, A_{exc}, and ΔG_{exc} trends. Understanding these interactions is essential for designing biomimetic membranes, lipid-nanoparticle systems, and nanostructured lipid platforms in biomedical and nanotechnological applications, while future studies should focus on real-time lipid-nanoparticle interactions and their impact on monolayer stability under dynamic conditions.

Author Contributions

The percentages of the authors' contributions are presented below. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

	N.S.	S.S.	U.S.
C	40	30	30
D	40	30	30
S	40	30	30
DCP	40	30	30
DAI	40	30	30
L	40	30	30
W	40	30	30
CR	40	30	30
SR	40	30	30
PM	40	30	30
FA	40	30	30

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans.

References

Bodik M, Jergel M, Majkova E, Siffalovic P. 2020. Langmuir films of low-dimensional nanomaterials. Adv Colloid Interface Sci, 283: 102239.

Cullis PR, Hope MJ, Bally MB, Madden TD, Mayer LD, Fenske DB. 1997. Influence of pH gradients on the transbilayer transport of drugs, lipids, peptides, and metal ions into large unilamellar vesicles. Biochim Biophys Acta, 1331: 187-211.

Dana RM. 1999. The monolayer technique: a potent tool for studying the interfacial properties of antimicrobial and membrane-lytic peptides and their interactions with lipid membranes. Biochim Biophys Acta, 1462: 109-140.

Ding C, Tong L, Feng J, Fu J. 2016. Recent advances in stimuli-responsive release function drug delivery systems for tumor treatment. Molecules, 21: 1715.

Ganta S, Devalapally H, Shahiwala A, Amiji M. 2008. A review of stimuli-responsive nanocarriers for drug and gene delivery. J Control Release, 126(3): 187-204.

Gao W, Chan JM, Farokhzad OC. 2010. pH-responsive nanoparticles for drug delivery. Mol Pharm, 7(6): 1913-20.

Gong K, Feng SS, Go ML, Soew PH. 2002. Effects of pH on the stability and compressibility of DPPC/cholesterol monolayers at the air-water interface. Colloids Surf. A: Physicochem. Eng Asp, 207: 113-125.

Hao C, Li J, Mu W, Zhu L, Yang J, Liu T, Li B, Chen S, Sun R. 2016. Adsorption behavior of magnetite nanoparticles into the DPPC model membranes. Appl Surf Sci, 362: 121-125.

He H, Sun R, Hao C, Yang J, Wang M, Zhang L. 2014. Thermodynamic analysis and AFM study of the interaction of palmitic acid with DPPE in Langmuir monolayers. Colloids Surf. A: Physicochem Eng Asp, 441: 184-194.

Jurak M. 2013. Thermodynamic aspects of cholesterol effect on properties of phospholipid monolayers: Langmuir and Langmuir–Blodgett monolayer study. J Phys Chem B, 117(12): 3496-3502.

Jurak M, Mroczka R, Łopucki R. 2018. Properties of artificial phospholipid membranes containing lauryl gallate or cholesterol. J Membr Biol, 251: 277-294.

Marsh D. 1996. Lateral pressure in membranes. Biochim. Biophys Acta, 1286: 183-223.

Moya Betancourt SN, Cámara CI, Riva JS. 2023. Interaction between pharmaceutical drugs and polymer-coated Fe3O4 magnetic nanoparticles with Langmuir monolayers as cellular membrane models. Pharmaceutics, 15: 311.

Oliveira ON Jr, Caseli L, Ariga K. 2022. The past and the future of Langmuir and Langmuir-Blodgett films. Chem Rev, 122: 6459-6513.

Peetla C, Jin S, Weimer J, Elegbede A, Labhasetwar V. 2014. Biomechanics and thermodynamics of nanoparticle interactions with plasma and endosomal membrane lipids in cellular uptake and endosomal escape. Langmuir, 30: 7522-7532.

Piosik E, Ziegler-Borowska M, Chełminiak-Dudkiewicz D, Martyński T. 2021. Effect of aminated chitosan-coated Fe3O4 nanoparticles with applicational potential in nanomedicine on DPPG, DSPC, and POPC Langmuir monolayers as cell membrane models. Int J Mol Sci, 22: 2467.

Rosilio V. 2017. How can artificial lipid models mimic the complexity of molecule-membrane interactions? Adv. Biomembr. Lipid Self-Assembly, 27: 107-141.

Salas SD, Villanueva ME, Selzer SM, Ferreyra NF, Vico RV. 2024. A systematic study of the impact of aromatic/aliphatic amines and protein corona as coatings of iron oxide magnetic nanoparticles on the interaction with DPPC Langmuir monolayers. Surf Interfaces, 51: 104771.

Swierczewski M, Bürgi T. 2023. Langmuir and Langmuir–Blodgett films of gold and silver nanoparticles. Langmuir, 39: 2135–2151.

Szcześ A, Jurak M, Chibowski E. 2012. Stability of binary model membranes—Prediction of the liposome stability by the Langmuir monolayer study. J Colloid Interface Sci, 372: 212-216.

Torrano AA, Pereira ÂS, Oliveira Jr ON, Barros-Timmons A. 2013. Probing the interaction of oppositely charged gold nanoparticles with DPPG and DPPC Langmuir monolayers as cell membrane models. Colloids Surf B: Biointerfaces, 108: 120-126.

Vázquez-González ML, Botet-Carreras A, Domènech Ò, Montero TM, Borrell JH. 2019. Planar lipid bilayers formed from thermodynamically-optimized liposomes as new featured carriers for drug delivery systems through human skin. Int J Pharm, 563: 1-8.

Wrobel EC, Guimarães IDL, Wohnrath K, Oliveira ON Jr. 2024. Effects induced by η^6-p-cymene ruthenium(II) complexes on Langmuir monolayers mimicking cancer and healthy cell membranes do not correlate with their toxicity. Biochim Biophys Acta Biomembr, 1866: 184332.

Zhang W, Wang F, Wang Y, Wang J, Yu Y, Guo S, Chen R, Zhou D. 2016. pH and near-infrared light dual-stimuli responsive drug delivery using DNA-conjugated gold nanorods for effective treatment of multidrug resistant cancer cells. J Control Release, 82: 204.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1526954

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)
Cilt 8 - Sayı 3: 846-854 / Mayıs 2025
(Volume 8 - Issue 3: 846-854 /May 2025)

TÜRKİYE'DE KAMU OKUL VE HASTANE İNŞAATI PROJELERİNDE FARKLI ÖN MALİYET TAHMİN YÖNTEMLERİNİN PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI: GÜNEY MARMARA BÖLGESİ ÖRNEĞİ

Latif Onur UĞUR[1]*

[1]*Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 81620, Düzce, Türkiye*

Özet: İnşaat projelerinin tasarım aşamasında gerekli olan ön maliyet tahmini değerleri, yatırımın gerçekleştirilebilmesi ile ilgili çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmanın amacı; gerçek inşaat maliyetleri ve hesaplanan ön maliyetler açısından sapma miktarlarının belirlenmesinde katkı sağlamak, yukarıda anılan yöntemlerin okul ve hastane yapılarındaki performanslarını karşılaştırmaktır. Bunun için Güney Marmara bölgesinde kamu tarafından yapılan ihalelerle inşa ettirilen beş adet okul ve iki adet hastane yapısının (ayrıca üç farklı bölgedeki üç hastane yapısının daha) metraj ve keşifleri çıkarılarak (2021 yılı rayiçleriyle) Birim Fiyat Yöntemine göre gerçek maliyetleri bulunmuştur. Aynı yapıların maliyetleri, bu kez anılan ön maliyet tahmin yöntemleri ile hesaplanarak gerçek maliyetlerden sapma oranları araştırılmıştır. İlgili zaman dilimi esnasında dünyada ve Türkiye'de yaşanan Covid 19 Pandemisi şartları ve yüksek enflasyonist ekonomik şartlar da ihmal edilmeden yöntemlerin hata oranları karşılaştırılmıştır. Edinilen verilere göre Alan Yöntemi, okul yapılarında %113, hastane yapılarında %97 hata ile maliyet tahmini yaparken; Hacim Yöntemi aynı sıra ile %121 ve %120 hata ile tahminde bulunmaktadır. Kat Kabuğu Yönteminin hata oranı ise yine aynı sıra ile %158 ve %203 düzeylerinde gerçekleşmiştir. Gerek yatırımcı kurumların gerekse inşaat firmalarının; yapıların ön tasarım aşamasında kullandıkları ön tahmin yöntemlerinin hata oranlarını bilerek, yaklaşık yapı maliyeti tahmini gerçekleştirmelerinin ihalelere sağlıklı teklifler verilmesi ve projelerin gerçekleştirilebilmesi konusunda katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışmada aynı anda, farklı yöntemlerin kullanılması ile yapılacak tahminlerin farklı yapı/bina tipleri için ve daha önceki çalışmalarla birbirinden farklı sonuçlar verebileceği; bu sebeple her yapı ve yöntem için, firmaların ayrı hesaplar yaparak, farklı güvenilirlik derecelerine ulaşmaları ve alacakları kararları bu kapsamda değerlendirmeleri gerektiğinin altı da çizilmek istenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yapı maliyeti, Ön maliyet tahmin yöntemleri, Alan yöntemi, Hacim yöntemi, Kat kabuğu yöntemi

Comparison of Performance of Different Preliminary Cost Estimation Methods in Public School and Hospital Construction Projects in Türkiye: South Marmara Region Example

Abstract: Preliminary cost estimation values required in the design phase of construction projects play a very important role in the realization of the investment. The purpose of this study; to contribute to the determination of deviation amounts in terms of actual construction costs and calculated preliminary costs, and to compare the performances of the above-mentioned methods in school and hospital structures. For this purpose, the quantity surveys and surveys of five schools and two hospital structures (as well as three more hospital structures in three different regions) constructed with public tenders in the Southern Marmara region were taken and their actual costs were found according to the Unit Price Method (with 2021 current prices). The costs of the same structures, this time, were calculated with the aforementioned preliminary cost estimation methods and the deviation rates from the actual costs were investigated. The error rates of the methods were compared without neglecting the Covid 19 Pandemic conditions and high inflationary economic conditions experienced in the world and Türkiye during the relevant time period. According to the obtained data, the Area Method makes a cost estimation with a 113% error in school buildings and a 97% error in hospital buildings; while the Volume Method makes estimates with 121% and 120% errors, respectively. The error rates of the Floor Shell Method were again at the levels of 158% and 203%, respectively. It is thought that both investing institutions and construction companies; Knowing the error rates of the preliminary estimation methods they use in the preliminary design phase of structures and making approximate construction cost estimations will contribute to submitting healthy offers to tenders and realizing projects. In the study, it was determined that the estimations to be made by using different methods at the same time may give different results for different structure/building types and compared to previous studies; For this reason, it is also desired to underline that companies should make separate calculations for each structure and method, reach different reliability levels and evaluate the decisions they will take within this scope.

Keywords: Building cost, Preliminary cost methods, Area method, Volume method, Storey enclosure method

***Sorumlu yazar (Corresponding author):** Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 81620, Düzce, Türkiye
E mail: latifugur@duzce.edu.tr (L. O. UĞUR)
Latif Onur UĞUR https://orcid.org/0000-0001-6428-9788

Gönderi: 08 Ağustos 2024 **Received:** August 08, 2024
Kabul: 13 Nisan 2025 **Accepted:** April 13, 2025
Yayınlanma: 15 Mayıs 2025 **Published:** May 15, 2025

Cite as: Uğur LO. 2025. Comparison of performance of different preliminary cost estimation methods in public school and hospital construction projects in Türkiye: south Marmara region example. BSJ Eng Sci, 8(3): 846-854.

1. Giriş

Maliyetler, projelerin fizibilite çalışmalarında ve projenin erken aşamalarındaki karar alma süreçlerinde birincil kriter olarak kabul edilir (Heralova, 2017). Maliyet tahmini, bir projeyi geliştirmek için gerekli kaynakları nicelleştirerek ve değerlendirerek maliyet tahminleri üretme sürecidir (Amos, 2004). Süreç, tahminlerin başlangıç ve tasarım aşamalarında mevcut olan bilgi düzeyine göre güncellenmesi anlamında yinelemelidir ve bu da karar alma süreci için temeldir. Maliyet tahmini, projenin ekonomik fizibilitesinin belirlenmesini ve alternatiflerin değerlendirilmesini sağlar, ayrıca proje sahiplerinin ilk aşamalarda daha fazla etkiye sahip olması nedeniyle kapsam için bir itici güç olabilir (PMI, 2016). Bir inşaat projesinin başarısı, proje maliyetinin başlangıç aşamasında ne kadar hassas bir şekilde tahmin edildiği ve yaşam döngüsü boyunca nasıl yönetildiği ile değerlendirilebilir (Ahn vd., 2017). Genel olarak maliyet tahminleri amaçları doğrultusunda tanımlanırlar. Bir ihaleye teklif verilmesi için, bütçe oluşturulması için veya proje fon temini amaçlı vb. olabilirler (Gücüyener, 2005). Ön maliyet tahmini bir inşaat projesinin fizibilite, ön tasarım aşamasında gerçekleştirilen konsept maliyet tahminidir. Gerçekleştirilen literatür araştırmasında daha çok inşaat maliyetini içermekte fakat bazı çalışmalarda ilk yatırım maliyeti olarak değerlendirilmektedir. Ön maliyet tahmini için gerekli en önemli dört ana eleman geçmiş projelerden oluşan bir veritabanı; geçmiş maliyet değerlerini güncellemeyi sağlayan maliyet indeksleri, güncel üretkenlik oranları, spesifik saha koşulları vb. gibi bilgileri içeren güncel veri tabanı; tahmin algoritmalarını içeren bir tahmin metodolojisi, yöntemi ve tüm bunları organize eden tahmincidir (Çelik 2006).

Bir inşaat projesinde inşaat maliyetlerinin tahmininin doğruluğu, projenin başarısında kritik bir faktördür. Erken aşamada minimum proje bilgisi ile inşaat maliyetlerini tahmin eden maliyet tahmin modelleri, bir inşaat projesinin ön tasarım aşamasında faydalıdır. Proje yöneticilerinin kullanımına sunulan iyileştirilmiş maliyet tahmin teknikleri, inşaat projelerinde zaman ve maliyetlerin daha etkili bir şekilde kontrol edilmesini kolaylaştıracaktır. Maliyet tahmini görevinin büyük önemine rağmen, projenin erken aşamalarındaki bilgi eksikliği nedeniyle ne basit ne de anlaşılırdır (Perera ve Watson, 1998).

İnşaat projelerinin erken aşamalarında maliyetleri tahmin etmek için en yaygın kullanılan yöntem yüzeysel alan yöntemidir (Ashworth, 2015). Kat alanı yöntemi olarak da adlandırılan bu yöntem, toplam brüt iç kat alanının tarihsel verilere dayalı uygun bir maliyet/m^2 ile çarpılmasından oluşur (RICS, 2017). Bu geleneksel yöntem, -%15 ile +%25 arasında değişen düşük bir doğruluk sağlar (Abourizk vd., 2002, Ashwoth, 2008). Maliyet tahminlerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak, karar vericinin alternatifleri en iyi şekilde değerlendirme ve projelerin erken aşamalarında yatırım kararlarını iyileştirme yeteneği için son derece önemlidir.

Önceki çalışmalarda, kullanımı zor olan birçok girdiye dayalı olarak nihai inşaat maliyeti değerlerini tahmin etmek için modeller geliştirilmiştir. Ancak, nispeten az girdiye sahip modellere güvenmek, tahmin sonuçlarının doğruluğunu azaltacaktır (Khalid vd., 2025).

İnşaat sektöründe maliyet tahmini, maliyet planlaması ve bütçeleme için esastır ve proje geliştirmenin tüm aşamalarında yer alır. Bir inşaat projesinin maliyet açısından analizi, planlamadaki en hayati sorunlardan biridir. Yapı sektörü doğası gereği güçlü bir rekabet alanıdır ve tahmin çalışmaları hayati öneme sahiptir. (Uğur vd., 2019; Özmaden ve Erdal 2020; Sueri ve Erdal 2022).

Maliyet tahminlerinde kimi zaman oldukça büyük miktarda sapmalar meydana gelmektedir (Ayaydın, 2000). Ayrıca tahminlerden elde edilen sonuçlara kesin gözüyle bakılmamalıdır (Eski, 1993). Maliyet tahmini sonucu doğru, yüksek ya da düşük olabilir. Doğru hesaplanan projeler en ekonomik olarak gerçekleşen projeler olurken, düşük ya da yüksek tahminler daha fazla harcamalara sebep olurlar (Çelik 2005).

Doğruluk maliyet tahmin performansının bir ölçüsüdür. Tahmin, gerçeğin doğru bir yansıması olması gerektiğine göre, maliyet tahminini etkileyen faktörler aynı zamanda tahminin doğruluğunu ve güvenilirliğini etkileyen faktörler olarak da değerlendirilebilirler (Asworth, 1988). Tahminin doğruluğu ve güvenilirliği; tahmin için ayrılan süreye, ele alınan projenin mevcut detay seviyesine, eldeki verinin kalitesine, kullanılan tahmin modeline ve tahmincinin kişisel beceri ve tecrübesi ile de yakından ilişkilidir (Seyyar, 2000). Tahminin doğruluğu, gerçekleşen maliyet ile tahmin arasında karşılaştırma yapılarak anlaşılabilir. İhalelerde ise, gerçek maliyet sadece ihaleyi kazanan tarafından bilinebileceği için, tahminin başarısını değerlendirme konusu önemli bir problem noktasıdır (Yaylagül, 1994). Doğru maliyet tahminleri, yatırımcıların nakit akış eğrilerini daha hassas yönetmelerini sağlarken, uygulayıcı paydaşların da iş planlarını daha doğru bir şekilde yapmalarına olanak tanır (Çakmak ve Erdal, 2024).

Proje, tasarımın ilk aşamalarından inşaat aşamasına kadar geliştikçe, maliyet tahmini yöntemleri değişir. Prensip olarak, proje geliştikçe, daha fazla bilgi elde edilebilir hale gelir, dolayısıyla daha doğru tahmin olabilir ve daha kesin tahmin yöntemleri olabilir. Buna göre uluslararası platformda tahmin yöntemleri şu şekilde gruplandırılabilir (beklenen kesinlik parantez içinde belirtilmiştir):

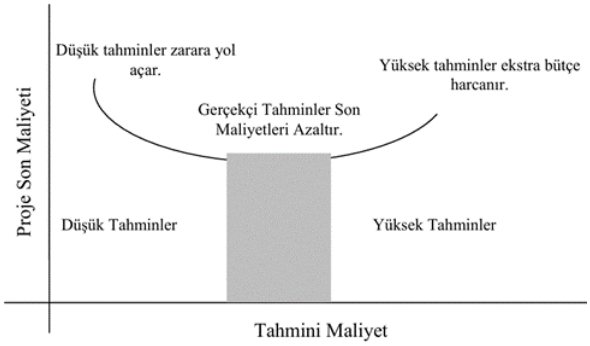
- Başlangıç aşamasındaki tahmin yöntemleri (%30 ila %50)
- Tasarım aşaması tahmin yöntemleri (%15 ila %30)
- İnşaat aşaması tahmin yöntemleri (%5 ila %15).

İlk iki sınıfa dahil edilen yöntemler ile yukarıdaki son sınıfa dahil edilenler arasındaki temel fark, birincisinin güvenilir tarihsel maliyet verilerine bağlı olması,

ikincisinin ise projenin tamamlanması için gereken kaynakların maliyetlerine dayalı analitik bir yaklaşım izlemesidir. Ayrıca, tasarım ekibi tarafından proje hakkında daha fazla bilgi yayınlandıkça tasarım aşamasında tahminin doğruluğu artar.

Herhangi bir inşaat işinin maliyet tahmini çeşitli yöntemlerle yapılır. Maliyet tahmin yöntemlerini kullanarak tahminin yaklaşık değeri elde edilir. Tahminde hesaplanan miktar, projenin yürütülmesine göre neredeyse kesindir. Bu yöntemlerin kullanımı temel olarak tahmin edilen yapının tasarım türüne ve şekline bağlıdır (Singh 2019).

Şekil 1.'deki Freiman Eğrisi, Maliyet Tahminlerinin Proje Sonu Maliyetler ile ilişkisini göstermektedir. Buradan görüleceği gibi maliyet tahmininin düşük ve yüksek olması durumunda da gerçekleşen maliyet, en düşük maliyetin üzerindedir (Phaobunjong, 2002).



Şekil 1. Freiman eğrisi.

Düşük hesaplamaları tasarım ve şartnamelerin tahmin edilenden daha fazla maliyet içermesi anlamına gelir. Bunun sebebi zayıf planlama ve tahmin sonucu önemli bileşenlerin ihmal edilmesidir. Bu tahmin proje gecikmelerine, organizasyonun ikinci bir defa oluşturulmasına, planlamaya sebep olur ki bu da maliyeti önemli ölçüde artırır (Çelik 2005). Yüksek tahmin de düşük tahmin gibi kötü sonuçlar doğurur. Proje daha düşük finansmanla gerçekleşebilecekken bu tahmin sonucunda ekstra bütçe çoğunlukla tamamen harcanacaktır. Proje sonunda daha düşük maliyetle tamamlanmış gibi gözükse de aslında daha fazla para harcanmıştır (Phaobunjong, 2002). Mevcut tasarım bilgilerinin miktarı arttıkça, maliyet tahmininin doğruluk oranı artmakta, ancak maliyet hesaplama işleminin süresi de artmaktadır (Bostancıoğlu, 2006).

Yeni proje nitelikleri maliyet tahmini metodolojisine bağlı olarak gerektiği şekilde belirtilir. Geçmiş projelere ait veri tabanında da gerçekleşmiş projelerle ilgili maliyet bilgileri, üretkenlik değerleri vb. gibi bilgiler bulunur. Güncelleme veri tabanı da maliyet indeksleri ile güncel üretkenlik verilerinden oluşmaktadır. Maliyet tahmini metotları, tasarım değişkenleri, yapım metotları, yapım işlemlerinin zamanlaması ve yapıya ilişkin çeşitli özelliklerin göz önünde bulundurulmasıyla oluşturulmuş yöntemlerdir (Saner 1993).

Projelerin erken aşamalarında inşaat maliyetlerinin tahminindeki düşük doğruluk, hesaplama gelişmelerinden yararlanan alternatif maliyetlendirme yöntemleri üzerine araştırmaları yönlendirmiştir, ancak bunların uygulamada kullanımındaki doğrudan çıkarımlar net değildir (Miranda vd., 2022).

Kuruoğlu vd., inşaat sektöründe kullanılan ön maliyet tahmin yöntemlerinin karşılaştırdıkları çalışmalarında; inşaat sektöründeki tüm firmaların sistematik bir şekilde bilgisayarlar aracılığıyla inşa ettikleri yapılara ait bilgileri kayıt etmeleri gerektiği, hem analizlerinde hem de tahmin hesaplamalarında daha hızlı, daha doğru sonuçlar elde etme yollarını aramalarının icap ettiği sonucuna varmışlardır (Kuruoğlu vd., 2011).

Bayram vd., çalışmalarında; Türkiye'de yapım maliyeti tahmininde yaygın olarak kullanılan ve en önemli veri tabanları olarak kabul edilen "İnşaat Birim Fiyat Yöntemi" (BFY) ve "Birim Alan Maliyeti Yöntemi" (BAMY) yaklaşımlarının maliyet tahmini performanslarının belirlenmesi ve kıyaslanması amaçlamışlardır. Anılan yöntemlerin Çevre ve Şehircilik İl Müdürlükleri tarafından 4734 sayılı Kamu İhale Kanunu'na göre ihale edilerek 2003-2011 yılları arasında tamamlanmış olan 420 kamu yapım işine ait ihalelelerde sırasıyla %13,57'lik ve %17,3'lük sapma oranları ile daha düşük hesaplandıkları belirlenmiş, BFY'nin BAMY'ye göre daha yüksek performans gösterdiği ancak tatminkâr düzeyde olmadığı tespit edilmiştir (Bayram vd., 2016).

Dünyada yapı maliyeti tahmini yapmak için kullanılan çok çeşitli yöntemler vardır. Birim maliyet değerleriyle; dönüştürme modeliyle; nedensel ve deneysel modeller ile regresyon modeliyle; boyutsuz büyüklükler ile olasılık modelleriyle; faktör yöntemiyle; uzman sistemleri ile; maliyet indeksleriyle; fonksiyonel elemanlara dayalı; yapı birimlerine dayalı; kaynaklara dayalı olarak vb. yöntemler sıralanabilir. Türkiye'de bu yöntemlerin bazıları sıklıkla kullanılmakta bazıları ise hiç bilinmemektedir. Türkiye'de ön maliyet tahminin sapma oranının %10 - %20 arasında olduğu belirlenmiştir. Bir firma için yüksek doğrulukta tahminler üreten bir metot diğer bir firma için aynı doğrulukta olmayabilir (Göktürk, 2007). Yapı ön maliyet tahmininde güncel olarak kullanılan modeller arasında Regresyon Analizi, ve Yapay Sinir Ağları yöntemleri de gerçeğe yakın tahminler sağlayabilmektedir (Uğur, 2018). Miranda vd., Tahmini maliyet hesaplama ve analiz tekniklerinin, inşaat projelerinin erken aşamalarında inşaat maliyetini tahmin etmedeki tahmini güçlerini ve en çok uygulanan tekniklerin hangileri olduğunu araştırmışlardır. Çalışmalarında maliyet tahmini araştırmaları için daha katı parametre tanımlama yöntemlerini izleyerek, daha iyi veriler ve öngörücü güç değerlendirmeleri kullanarak, modellerin daha güvenilir tahminler üretebileceği sonucuna varmışlardır (Miranda vd., 2022).

İnşaat projeleri vb. faaliyet sayası oldukça fazla olan projelerde ise sezgisel yaklaşımların uygun çözümler ürettiği bilinmektedir. Sezgisel yaklaşımlara örnek olarak

Seri ve Paralel Yöntem, Genetik Algoritma, Tabu Arama ve Yapay Sinir Ağları verilebilir (Kanıt vd., 2005).

Bazı projelerde özellikle de kamu projelerinde maliyetlerin parasal ifade ile karşılaştırılması mümkün değildir. Bunun en önemli nedeni ise kamu yatırım projelerinin büyük ölçüde sosyal içerikli yatırımlardan oluşmasıdır. İçme suyu, eğitim, sağlık, ulaştırma, enerji gibi projelerde klasik anlamda proje değerlendirme ve analiz teknikleri kullanılamamaktadır. Zira bu projeler insan yaşamını etkileyen ve vazgeçilmez olan projelerdir. Maliyetleri yüzünden vazgeçmek ya da alternatif bulmak kimi zaman zor, kimi zamanda imkânsızdır (Manav ve Erdal 2017). Okul ve hastane yapılarının da sosyal faydaları açısından bu gruba dahil olduğu açıktır.

Bu çalışmada birinci derecede incelenen ön maliyet tahmin yöntemleri, bu yöntemlerin avantajları ile dezavantajları aşağıda açıklanmıştır.

1.1. Hacim Yöntemi

Yapının maliyetinin hacmine dayanarak hesaplandığı bir yöntemdir. Bu yöntem özellikle İkinci Dünya Savaşı sırasında yaygın olarak kullanılmıştır (Topçu 1989). Bu yöntemde yapı maliyetinin yapı hacmine oranı olarak tanımlanan metreküp maliyet, yükseklik faktörünü de dikkate almak istediğinden doğmuştur. Yöntemin uygulandığı ülkelerde tahmin büroları ellerinde bir küp kitabı bulundurmakta ve bir proje için sözleşme imzalandığında kabul edilen teklifin değerini bina hacmine bölerek bu kitaba işlemekteydi (Usta 1994). Bu yöntem, maliyetleri karşılaştırılan binalar çok büyük benzerlikler taşımadıkça fazla kullanışlı olmamaktadır. Kat adedindeki farklılıklar bile maliyetlerde büyük sapmalara ve hesap hatalarına neden olabilmektedir.

İlave bir kat, birçok imalat miktarını artırır ve maliyete önemli ölçüde yansır. Tüm bu eksiklikler çoğu tip projelerin tahmininde hacim yönteminin terk edilmesine sebep olmuştur. Bina maliyetinin hacimden çok, döşeme alanı ile sıkı bir ilişki içinde olduğunun anlaşılmasından itibaren bu maliyet tahmin yöntemi bugün de çoğu proje tipinde pek kullanılmamaktadır. Genellikle Devlet Su İşleri kurumunun bazı projelerinde kullanılabilmektedir (Usta 1994). Bu yöntem belli bir hacme sahip bina tipi yapılarda yani depolar, kapalı spor salonları, büro binası vb. yapılarda uygulanabilir. Bu yöntem aşağıdaki aşamalar doğrultusunda maliyet tahmini ve hesaplamalarında uygulanmaktadır: 1) Bu yöntemde yapılacak ilk iş proje tipi seçilir. (hastane, tiyatro binası vb.) 2) Belirli kıstaslar göz önüne alınarak benzer projeler veri tabanından süzülür. 3) Bu aşamada benzer projelerin hacmi hesaplanır. RIBA (Royal Institute of British Architects) tarafından temel işlemsel kuralları konulmuş binanın her bir parçasının, en, boy ve yüksekliğinin (dış ölçüler) çarpımıyla binanın m^3 hacim miktarı elde edilir (Seyyar 2000, Ashworth 2008).

Avantajı: Bu yöntemin tek avantajı kolaylığıdır (Topçu 1989).

Dezavantajları:

- Yapı sahibini faydalı alan hakkında bilgilendirmemesi,
- Plan formu, kat sayısı gibi faktörleri dikkate almaması (Seyyar 2000).
- Ayrıca binanın özelliklerine bağlı olarak m^3 birim belirlenmesi de oldukça zordur.

Aynı yapı hacmine sahip binaların maliyetini eşit veren yöntem ile avan proje aşamasında hesap yapılabilmesine karşın, gerçekte farklı maliyete sahip olan alternatif projeler arasında seçim yapılamaz (Eski 1993).

1.2. Birim Alan Yöntemi

Taban alanı yöntemi, basitliği nedeniyle birçok Avrupa ülkesinde çok popülerdir. Ayrıca ön tahmin için de yeterlidir, ancak açıkçası yukarıda açıklanan birim başına maliyet yönteminden daha fazla proje bilgisine ihtiyaç duyar. Projenin toplam maliyeti şu şekilde verilecektir:

Toplam maliyet = metrekare başına maliyet x toplam proje alanı.

Birim alan yöntemi, plan alanı ilişkisiyle maliyeti belirleyen ve uygulamada en çok kullanılan bir yöntemdir. Planın biçimsel yönden özellik göstermediği ve kat yükseklikleri arasındaki farklılaşmaların az olduğu durumlarda kullanılabilmektedir. Bu yöntemde kullanılacak projeler % 100 tamamlanmış olmalıdır (Roney 1992). Bu model konut, fabrika, depo, hastane, okul, kule vb. inşaat projelerinde uygulanabilir.

Yöntemin kullanılabilmesi için yapının öncelikle her kat seviyesinde iç boyutları ölçülmelidir. İç duvarlar, kanallar, asansörler veya merdiven kasaları için herhangi bir kesinti yapılmaz. Önceki benzer binaların maliyetleri, yukarıdaki ifade kullanılarak toplam proje maliyetinin hesaplanmasında kullanılabilecek metrekare başına sağlam bir maliyet oluşturmak için kullanılır. Konum ve enflasyon için geçmiş verilerde ayarlamalar yapılabilir.

Avantajları:

- Hacim ve birim yöntemlerine göre daha hassastır.
- Maliyetin döşeme alanı ile olan ilişkisi hacmi ile ilişkisinden daha fazladır (Topçu 1989).
- Bu yöntem bina planının biçimsel açıdan farklılık göstermediği ve kat yüksekliklerinin arasındaki değişiklikler büyük değilse kullanılabilir.
- Plan şeması, büyüklük vb. gibi faktörler, göz önüne alındığından bu yöntem sonucu elde edilen tahmin güvenilir olmaktadır (Seyyar 2000).

Dezavantajları:

- Bu yöntemde üçüncü boyuta ait özellikler yoktur. Bu da bina kabuğunda oluşan ve farklı malzeme girdilerinden dolayı denetlenemeyen bir takım maliyet sapmalarının oluşmasına neden olmaktadır (Eski 1993).
- Plan şeklindeki değişiklikleri ve toplam bina yüksekliğini doğrudan hesaba almaz (Eski 1993).
- İnşaat yeri ve koşulları, inşaat yöntemleri, malzemeler, dış yüzey kalitesi, tesisat özellikleri ve kalitesi gibi birçok değişkene dağıtım yapılması gerektiğinden dolayı mevcut binaların bilinen fiyatlarının değerlendirilerek m^2 birim fiyatının tespit edilmesi zordur.
- Avan proje evresinde maliyet hesabı yapılacak aynı alana sahip iki binanın bu yöntem sonucu maliyeti aynı olmasına rağmen gerçekte farklı olmasından dolayı

projeler arasında seçim yapılamaz (Eski 1993).

- Kat yüksekliği, plan biçimi, büyüklüğü, inşaatların kalite sınıfları arasındaki farklar gibi etkenler göz önüne alınmadığı için sonuçlar yeteri kadar hassas değildir (Erdem 1996).
- Alan yöntemi, bina kat yüksekliği çok fazla ise güvenilir değildir (Topçu 1989).
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı m^2 maliyet verileri bir yıl için belirlenmekte bu nedenle bu bilgiler tahminin gerçekleştirileceği gün için güncel nitelik taşımamaktadır.

1.3. Kat Kabuğu Yöntemi

Kat kabuğu yöntemi, yapının dış duvarları, kat döşemeleri ve çatı döşemesi alanlarının hesaplanarak bu alanların da her birinin belirli katsayılarla çarpılması sonucu elde edilen değerlerin toplamı sonucunda kat kabuğu olarak adlandırılan değer ile yapının maliyeti arasında kurulan ilişkiye dayanmaktadır (Eski 1993). Bu model depolar, büro binası vb. gibi inşaat projelerinde uygulanabilir. Bu modeldeki parametreler bina tipi, inşaatın yapıldığı yer, (kat döşeme alanları, çatı alanı ve dış duvarların alanıdır). Bu model aşağıdaki aşamalar doğrultusunda uygulanır:

1) Proje tipi seçilir. (otel, apartman, hastane vb.)
2) Belirli kıstaslar göz önüne alınarak benzer projeler proje veri tabanından süzülür.
3) Seçilen projelerin kat kabuğu değeri hesaplanır.

Avantajları:

- Binanın plan şemasına daha fazla önem verdiği için diğer metotlardan daha hassas sonuçlar verir (Eski 1993).
- Yöntem plan biçimini, kat yüksekliklerini ve yapının Göktürk'e göre; Birim Maliyete dayalı tahmin yaklaşımında firmaların sık karşılaştıkları zorluklar; Zaman yetersizliği, projenin ilerleyen safhalarında idarenin ihtiyaç ve beklentilerini değiştirmesi, projeye ait yetersiz bilgi bulunmasıdır ve ön maliyet tahmin sapma oranı ortalaması %14.6'dır. Ön Maliyet tahmini yapılacak projeye ait yetersiz bilgi bulunması, zaman yetersizliği ve proje belirsizliği, konsept değişiklikleri sık karşılaşılan zorluklar içerisindedir (Göktürk, 2007).

Uğur ve Akdık'ın 2019'da yaptıkları bir araştırmaya göre; Aydın ilinde yapımı gerçekleştirilen "zemin + 4 katlı, 20 daireli" bir konut yapısının Birim Fiyat Yöntemi ile hesaplanan maliyetiyle; Birim Alan Yöntemi, Kat Kabuğu Yöntemi ve Hacim Yöntemi ile hesaplanan maliyetler arasında sırasıyla; %128, %156 ve %86 düzeylerinde farklar bulunduğu tespit edilmiştir (Uğur ve Akdık 2017). Uğur ve Penbe, Betonarme çok katlı konut yapılarının maliyetinde Birim Fiyat Yöntemi (UPM) ve Birim Alan Maliyet Yöntemi (UACM) tahmin performanslarının karşılaştırılması yapılmıştır. BFY yardımıyla hesaplanan maliyet tahminlerinin ortalama hata oranı %22,74 iken BAMY yardımıyla elde edilen maliyetlerin ortalama hata oranı ise %25,09'dur (Uğur ve Penbe, 2021).

Bu çalışmada Güney Marmara Bölgesi'ndeki kamu okul ve hastane maliyetlerinin Alan, Hacim ve Kat Kabuğu tüm yüksekliğini hesaba kattığından diğer modellerden daha başarılı bulunmaktadır. Dezavantajları:

- Veriler kolay elde edilememekte bu da yöntemin kullanımını engellemektedir (Seyyar 2000).
- Tüm duvar, döşeme ve çatının tek tek alanları ölçüldükten sonra ayrı katsayılarla çarpılması yöntemin eleştirilmesine sebep olmuştur.
- Bu yöntem de binanın fiziksel formunu göz önüne almamaktadır (Topçu 1989).

Bu yöntem önerildiğinde, diğer tek oranlı tahmin yöntemlerinde tespit edilen sorunların plan şekli ve kat yüksekliğindeki değişimler dikkate alınarak aşılması hedeflenmiştir. Ne yazık ki, diğer tek oranlı yöntemlerden çok daha fazla hesaplama gerektirdiğinden ve ihtiyaç duyulan oranlar doğrudan geçmiş verilerden çıkarılamadığından, yöntem inşaat uzmanları tarafından tam olarak benimsenmemiştir.

Diğer birçok faktör bir tahminin doğruluğunu etkiler. Yanlış fiyatlandırma kullanımı, fiyat bilgilerinin kullanılabilirliği ve uygun fiyatlandırma yöntemleri gibi tahmin prosedürü sırasında hatalar meydana gelebilir. Hatalı atlanan öğeler veya yanlış boyutlar gibi tasarım değişiklikleri ve eksik veriler de çıktıyı etkiler. Tahmincinin belirli maliyet kalemlerini gözden kaçırmak veya atık parçaları planlamamak gibi kötü yargıları, doğruluğu etkileyen insan hatasının bir parçasıdır. Hava durumuna bağlı belirsizlikler, inşaattaki gecikmeler, denetim politikaları, farklı inşaat yöntemleri, ekonomik ve siyasi konular, değişen inşaat teknolojisi, ekipman ve malzemelerin mevcudiyeti ve işgücü verimliliğindeki farklılıklar maliyet tahminlerinin doğruluğunu etkileyebilecek dış etkilerden bazılarıdır (Gaffney 2021).

Yöntemleri ile yapılacak ön maliyet tahminlerinin gerçek maliyetler göre sapmaları hesaplanacak; hangi tip yapı için hangi yöntemin hata sınırlarının hangi aralıklar içinde kaldığı belirlenerek uygulamacılara gereken yapı tipi kategorizasyonları yapabilmeleri, sınır değerleri kontrol edebilmeleri ve en uygun tahmin yöntemini seçebilmeleri için bir karşılaştırma düzlemi sunulacaktır. Literatüre de okul ve hastane yapıları maliyetlerinin ve bölgesel değişimlerin farklı ön tahmin yöntemleri ile hesaplanmasında (kısıtlı sayıda örnekle de olsa) hata sınırları değerleri kazandırılacaktır. Önceki örneklerdeki hata oranları ile çalışma bulguları arasındaki paralellikler ve farklılıklar değerlendirilecektir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Birim Fiyat Rayiçleri esası ile maliyeti hesaplanan okul ve hastane yapılarının ön maliyetleri; Alan, Hacim ve Kat Kabuğu Yöntemleri ile yeniden hesaplanarak aradaki oransal maliyet farkları karşılaştırılmıştır. Bunun için 2020 yılında inşaatları tamamlanmış; Düzce ili dahilinde Milli Eğitim Bakanlığı bünyesinde yapısı tamamlanan 5 okul projesi ve Bursa, Düzce, Çanakkale, Diyarbakır ve Isparta illerinde Sağlık Bakanlığınca yaptırılan 5 hastane projesi esas alınmıştır. Her projenin farklı yöntemlerle

hesaplanan maliyet değerleri; Birim Fiyat Yöntemi maliyetleri ile karşılaştırılarak hata oranları belirlenmiştir. Edinilen bulgular tablolar yardımı ile anlamlandırılmış ve karşılaştırılmıştır. Hesaplamalarda 2020 yılı maliyetleri esas alınmıştır. İlgili zaman dilimi esnasında dünyada ve Türkiye'de yaşanan Pandemi şartları ve yüksek enflasyonist ekonomik şartlar da ihmal edilmeden yöntemlerin hata oranları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada aynı anda, farklı yöntemlerin kullanılması ile yapılacak tahminlerin farklı yapılar için ve daha önceki çalışmalarla birbirinden farklı sonuçlar verebileceği; bu sebeple her yapı ve yöntem için, firmaların ayrı hesaplar yaparak, farklı güvenilirlik derecelerine ulaşmaları ve alacakları kararları bu kapsamda değerlendirmeleri gerektiğinin altı çizilmek istenmiştir. Çalışma verilerinin elde edildiği ve hesaplamalarının yapıldığı dönemin ekonomik olarak normalden hareketli bir özelliğe sahip olduğu unutulmamalıdır.

3. Bulgular ve Tartışma

Düzce ilinde yapımı tamamlanan 5 okul yapısına ait farklı yöntemlerle hesaplanan maliyetler ve bu maliyet değerlerinin Birim Fiyat Yöntemi bulguları ile karşılaştırıldığı veriler Tablo 1.'de sunulmuştur. Bu verilere göre gerçek okul maliyet değerleri olarak kabul edilen Birim Fiyat esaslı maliyet değerleri ile Alan Yöntemi ile gerçekleştirilen maliyet değerleri arasında ortalama %113 fark bulunduğu anlaşılmıştır. Aynı karşılaştırma sonucunda Hacim Yöntemi hata ortalaması %121 ve Kat Kabuğu Yöntemi hata ortalaması %158 düzeylerinde gerçekleşmiştir.

Bursa, Düzce, Çanakkale, Diyarbakır ve Isparta illerinde yapımı tamamlanan 5 hastane yapısına ait farklı yöntemlerle hesaplanan maliyetler ve bu maliyet değerlerinin Birim Fiyat Yöntemi bulguları ile karşılaştırıldığı veriler Tablo 2.'de sunulmuştur. Yalnızca Düzce ve Bursa'da yer alan hastaneler esas alınırsa; Alan Yönteminde %97, Hacim Yönteminde %120 ve Kat Kabuğu Yönteminde %203 oranlarında fark bulunduğu görünmektedir. Diğer üç il hastaneleri verileri ortalamaya dahil edilirse gerçek hastane maliyet değerleri olarak kabul edilen Birim Fiyat esaslı maliyet değerleri ile Alan Yöntemi ile gerçekleştirilen maliyet değerleri arasında ortalama %101 fark bulunduğu anlaşılmaktadır. Aynı karşılaştırma sonucunda Hacim Yöntemi hata ortalaması %107 ve Kat Kabuğu Yöntemi hata ortalaması %132 düzeylerinde gerçekleşmiştir.

Tablo 1. Okul maliyetlerinin farklı yöntemlere göre değerleri ve hata ortalamaları

	Düzce Gümüşova Ortaokulu	Merkez Anaokulu	Fatih İlkokulu	Bolu Kültür İlkokulu	Yığılca ÇPL
Derslik sayısı (Ad)	16	6	12	32	6
Öğrenci sayısı (Ad)	320	200	210	750	240
Kat sayısı (Ad)	5	2	3	5	2
Taban alanı (m^2)	3920	660	3398	2200	512,7
Yapı alanı (m^2)	23520	1320	13592	11200	1025,4
Hacim (m^3)	12844	2178	12234,06	45702	4030,9
Bodrum kat (Ad)	1	0	1	1	0
Kat Kabuğu değeri (m^2)	9950,75	1713	7750,07	30790	3159,72
Kat Kabuğu birim maliyeti (TL)	894	894	894	894	894
Alan birim maliyeti (TL/m^2)	2034,81	646,8	1971,23	1310,32	730,98
Hacim birim maliyeti (TL/m^3)	500	500	500	500	500
Birim Fiyat Yöntemi Maliyet (TL)	7.101.499,27	565.711,00	6.698.928,60	14.675.575,00	2.707.307,00
BM Oran	100%	100%	100%	100%	100%
Ortalama			100%		
Alan Yöntemi Maliyet (TL)	47.858.731,20	853.776,00	26.792.958,16	14.675.584,00	749.548,94
Birim M./Alan M. Oranı	15%	66%	25%	100%	361%
Ortalama			113%		
Hacim Yöntemi Maliyet (TL)	6.422.000,00	1.089.000,00	6.117.030,00	22.851.000,00	2.015.450,00
Birim M./Hacim M. Oranı	%)=	193%	91%	156%	74%
Ortalama			121%		
Kat Kabuğu Yönt. Maliyet (TL)	8.895.970,50	1.531.422,00	6.928.562,58	27.526.560,00	2.824.789,68
Birim M/K. Kabuğu M Oranı	125%	217%	103%	188%	104%
Ortalama			158%		

Tablo 2. Hastane maliyetlerinin farklı yöntemlere göre değerleri ve hata ortalamaları

	Ali Osman Sönmez Devlet Hastanesi	Çilimli Devlet Hastanesi	Çanakkale Devlet Hastanesi	Silvan Devlet Hastanesi	Isparta Eğridir Devlet Hastanesi
Yatak sayısı (Ad)	750	10	75	150	75
Kat sayısı (ad)	11	3	5	3	6
Taban alanı (m^2)	19913	1051	4962	5449	4166
Yapı alanı (m^2)	258864	3143,03	29973	27246	29164
Hacim (m^3)	507177	10000	96853,5	41440	90548
Bodrum kat (Ad)	2	1	1	2	1
Kat Kabuğu değeri (m^2)	850719,5	14849,87	15000	12803,73	15000
Kat Kabuğu birim maliyeti (TL)	800	800	800	800	800
Alan birim maliyeti (TL/m^2)	1219,76	2136,16	1653,75	1537,92	2907,61
Hacim birim maliyeti (TL/m^3)	750	750	750	750	750
Birim Fiyat Yöntemi Maliyet (TL)	29.677.621,00	6.714.006,00	69.957.888,00	41.987.592,00	57.470.000,00
BM Oran	100%	100%	100%	100%	68%
Ortalama			100%		
Alan Yöntemi Maliyet (TL)	315.751.952,64	6.714.014,96	48.701.184,75	41.902.168,32	84.797.440,02
Birim M./Alan M. Oranı	94%	100%	144%	100%	68%
Ortalama			101%		
Hacim Yöntemi Maliyet (TL)	380.382.750,00	7.500.000,00	726.401,25	31.080.000,00	67.911.000,00
Birim M./Hacim M. Oranı	128%	112%	104%	74%	118%
Ortalama			107%		
Kat Kabuğu Yönt. Maliyet (TL)	680.575.600,00	11.879.896,00	75.392.463,60	10.242.984,00	69.897.964,32
Birim M/K. Kabuğu M Oranı	229%	177%	108%	24%	122%
Ortalama			132%		

Yalnızca Düzce ve Bursa'da yer alan hastaneler esas alınırsa; Alan Yönteminde %97, Hacim Yönteminde %120 ve Kat Kabuğu Yönteminde %203 oranlarında fark bulunduğu görünmektedir. Diğer üç il hastaneleri verileri ortalamaya dahil edilirse gerçek hastane maliyet değerleri olarak kabul edilen Birim Fiyat esaslı maliyet değerleri ile Alan Yöntemi ile gerçekleştirilen maliyet değerleri arasında ortalama %101 fark bulunduğu anlaşılmaktadır. Aynı karşılaştırma sonucunda Hacim Yöntemi hata ortalaması %107 ve Kat Kabuğu Yöntemi hata ortalaması %132 düzeylerinde gerçekleşmiştir.

4.Sonuç

Yatırım projelerinin daha fikir aşamasındayken maliyetlerinin en düşük hata oranları ile tahmin edilmesi; gerek alternatifler arasında seçim yapılması, gerek yatırım kararının alınması, gerekse kaynak temini, bütçeleme, maliyet kontrolü gibi alanlarda birincil derecede önem arz etmektedir. Dünyada ve Türkiye'de kullanılan ön maliyet tahmin yöntemlerinden üç tanesinin gerçek maliyet değerlerine göre hangi oranlarda hata düzeylerine sahip tahminler yapabildiği; değerlendirme yapan ve karar verecek kimseler tarafından önceden bilinmesi gereken bir önemli konudur.

Maliyet tahminini etkileyen ana faktörler; Proje tipi ve büyüklüğü, Projenin gerçekleştirileceği bölgenin coğrafi konumu, Tasarım, Kullanılan teknoloji, Kullanılan sözleşme tipi, Mevcut ekonomik durum, Mevcut rekabet ortamı ve şartları, Finansman olanakları, Kullanılan tahmin modeli, Kullanılan enformasyon, Tahmin hesaplamaları için kullanılabilecek zaman, Tahmini yapan kişinin beceri ve tecrübe düzeyidir. Bunlar arasında kullanılan metodoloji ve yöntemler nihai maliyet tahmini için farklı ve önemli güvenilirlik değerlerine sahiptirler (Uğur ve Penbe, 2021).

Bu çalışmada 2020 yılında kamu tarafından yapımları tamamlanan 5 okul ve 5 hastane yapısının farklı ön maliyet yöntemleri ile maliyet tahmini hesaplamaları yapılmıştır. Her iki yapı tipi için de Kat Kabuğu Yöntemi ile yapılan tahminlerin hata oranları en fazla düzeyde olmuştur. Uygulanan yöntemlerden Alan Yönteminin hata oranı ise en düşük düzeyde gerçekleşmiştir. Her iki tip yapı için de Hacim Yöntemi, diğer iki yöntemin arasında hata düzeyine sahiptir.

Çalışmanın önemli bulgularından birisi; daha başlangıç aşamasında, detaylı projeler yokken Türkiye şartlarında yapılan maliyet tahmini hesaplarının hata oranlarının tamamının %100 değerinden fazla olduğudur. Bu değer, uluslararası kabul gören hata oranlarının (%30 - %50) ve Abourizk ve Asworth'un verdiği değerlerin (-%15 ile +%25 arasında) önemli derecede üzerinde bulunmaktadır. Bulgular; Türkiye'de çok katlı betonarme konut yapıları için yapılan Uğur ve Akdık çalışmasındaki Alan Yöntemi hata oranı %128, Kat Kabuğu Yöntemi hata

oranı %156 ve Hacim Yöntemi Hata oranı %86 değerleri ile parelellik göstermektedir. Örnek sayısı az olmakla birlikte, edinilen oranlarla, bu konuda Türkiye yada uluslararası platformlardaki yapı maliyetleri hesaplama yaklaşımlarının ve maliyet unsurlarının önemli derecede farklılıklar taşıdığı fikri akla gelmektedir. Bu önemli farkın sebebi başta Pandemi ve buna bağlı yüksek enflasyonist ekonomik ortam olabilir.

Hata oranları, okul yapıları ile hastane yapılarında farklılıklar göstermektedir. Literatür kısmında; bir apartman/konut yapısı için benzer yöntemlerin karşılaştırıldığı çalışmada da farklı oranların bulgulandığı görülmüştür. Dolayısı ile Türkiye'de örnekleme yapılan yapılar için yapı tiplerine göre hata oranlarının da değiştiği çıkarımı yapılabilir.

Yurdumuzda farklı yapı maliyeti hesaplama yöntemlerine göre düzenlenmiş veri bankalarının bulunmaması; daha az ve sınırlı örneklemelerle ve daha az güvenilebilir betimlemeler yapılması mecburiyetini getirmektedir. Örnek sayısının arttırılarak yapılacağı çalışmalarla; edinilecek bulguların güvenilirliği de daha yüksek olacaktır.

İlgili zaman dilimi esnasında dünyada ve Türkiye'de yaşanan Covit 19 Pandemisi şartları ve yüksek enflasyonist ekonomik şartlar da ihmal edilmeden yöntemlerin hata oranları karşılaştırılmıştır. Çalışma verilerinin elde edildiği ve hesaplamalarının yapıldığı dönemin ekonomik olarak normalden hareketli bir özelliğe sahip olduğu unutulmamalıdır. Ekonomik sürekliliğin devam ettiği gelecek zaman dilimlerinde benzer hesaplamaların yapılması; bu çalışmanın ekonomik dalgalanmalardan etkilenme düzeyi için fikir verebilir.

Sıklıkla kullanılan ve gerçeğe en yakın sonuçların alındığı Birim Fiyat Yöntemi esas alınarak yapılan hesaplamalar ile gerçek maliyetler değerlerine ulaşıldığı kabul edilen bu çalışmada; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı orijinli birim fiyatların Türkiye geneli için ilan edildiği, farklı bölgelerdeki hammadde, yarı mamul ve mamul fiyatları ile nakliye ve işçilik, makine ekipman maliyetlerinin ortalama değerlerinin alındığı; genel olarak bu yönteme getirilen eleştirilerin temelinde yer almaktadır. Bu çalışmanın karşılaştırılabilir bir yöntemle gerçek maliyetlere ulaşmasında kullanılan bu yöntemin bölgesel değişikliklerle yapım firmalarının kültürü, teknolojisi ve vizyonu ile değişeceği aşikardır. Başka bir coğrafi bölgede aynı yapıların gerçek maliyet değerleri de farklılıklar arz edebilecektir. Çalışma bulguları ilgili bölge, yapı tipi ve yapı sayıları ile sınırlı bulunmaktadır.

Çalışmadaki örnekleme sayısı, edinilen proje sayısı ile kısıtlı olduğundan sınırlı bir çıkarım yapılabilmekte, farklı bölgelerden edinilecek benzer projelerle kesinlik düzeyi daha yüksek tahmin değerlerine ulaşmak mümkün olabilecektir. Veri edinilen okulların tamamı ve hastanelerin bir tanesi Güney Marmara Bölgesi'nde yer alırken diğer hastaneler; Bursa, Çanakkale, Silvan ve Isparta'da yer almaktadır. Dolayısı ile üç hastane Güney Marmara Bölgesi'nde bulunmamaktadır. Yalnızca bölgedeki iki hastane (Düzce ve Bursa) değerleri esas alınırsa hastane maliyetleri için hata oranları; Alan Yöntemi %97, Hacim Yöntemi %120 ve Kat Kabuğu Yöntemi %203 değerlerini almaktadır.

İnşaat firmaların maliyet tahmin sürecinde gereken ilgi ve önemi firma bazında göstermeleri kendi lehlerine sonuçlanarak maliyet tahmini tutarlılığını geliştirmelerine imkan verecektir.

İhale bedelleri, Birim Fiyat Rayiçleri, toplam maliyet değerleri TL üzerinden olduğu için diğer yöntemler de TL üzerinden uygulanmıştır. Daha uzun bir süreçte, farklı para birimleri ile (USD; Euro vb.) benzer hesaplamaların yapılması döviz kuru ve enflasyon etkilerini minimize edebilir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazar katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	L.O.U.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedir.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

Abourizk SM, Babey GM, Karumanasseri G. 2002. Estimating the cost of capital projects: An empirical study of accuracy levels for municipal government projects. Can J Civ Eng, 29: 653-661.

Ahn J, Park M, Lee H, Ahn SJ, Ji SH, Song K, Son B. 2017. Covariance effect analysis of similarity measurement methods for early construction cost estimation using case-based reasoning. Autom Constr, 81: 254-266.

Amos S. 2004. Skills and knowledge of cost engineering. A

project of the education board of AACE international. AACE International: Morgantown, 5th ed., WV, USA, pp: 136.

Ashworth A, Perera S. 2015. Cost studies of buildings. Routledge: Abingdon, Oxon, UK, 6th ed., pp: 104.

Ashworth A. 2008. Pre-Contract studies: development economics, tendering, and estimating. Blackwell, Melden, MA, USA, pp: 128.

Ayaydın E. 2000. Bir yatırım projesi için uygulanan ve önerilen proje yönetim sistemi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, ss: 89.

Bayram S, Öcal ME, Laptalı Oral E, Atiş CD. 2016. Yapım maliyeti tahmininde birim fiyat yöntemi - yapı yaklaşık maliyetleri kıyaslaması. Politeknik Derg, 19(2): 175-183.

Bostancıoğlu E. 2006. Konut binalarının ön tasarımında bir maliyet tahmin modeli. DEÜ Müh Fak Fen Müh Derg, 8(3): 27-49.

Çakmak C, Erdal M. 2024. Doğal gaz boru hattı inşaatı maliyetlerinin çoklu doğrusal regresyon ve k-en yakın komşuluk yöntemleri ile tahmini. BSJ Sci, 7(6): 1327-1337.

Çelik LY. 2006. Türkiye'de inşaat sektöründe kullanılan ön maliyet tahmini yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, pp: 29.

Erdem AE. 1996. Konut projelerinde, ön tasarım aşamasında, fonksiyonel elemanlara dayalı maliyet tahmini için bir model geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, pp: 21.

Eski O. 1993. Avan (ön) proje evresinde bina maliyetinin inşaat imalatlarına dayalı olarak hesaplanmasına yönelik bir model. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, pp: 12.

Gaffney C. 2021. Unit method of cost planning. URL: https://smallbusiness.chron.com/unit-method-cost-planning-14497.html (accessed date: November 17, 2021).

Göktürk İ. 2007. İnşaat sektöründe fizibilite aşamasında maliyet tahmini yapmakta karşılaşılan zorluklar ve çözüm önerileri üzerine bir değerlendirme. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye , pp: 83.

Gücüyener M. 2005. Değişken birim fiyat usulü ile yapılan bir otoyol projesinde yüklenici yıllık maliyet yönetim sistemi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, ss: 86.

Heralova RS. 2017. Life cycle costing as an important contribution to feasibility study in construction projects. Procedia Eng, 196: 565-570.

Kanıt R, Baykan UN, Erdal M., 2005. Kısıtlı kaynak koşullarının yapı maliyetine etkisinin incelenmesi. Politeknik Derg, 8(2): 209-221.

Khalid SA, Alsugair AM, Alsanabani NM, Alabduljabbar AA, Almohsen AS. 2025. ANN Prediction model of final construction cost at an early stage. J Asian Archit Build Eng, 24(2): 775-799.

Kuruoğlu M, Topkaya E, Çelik LY, Erkan Yönez E. 2011. İnşaat sektöründe kullanılan ön maliyet tahmin yöntemlerinin karşılaştırılması. 6. İnşaat Yönetimi Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 25-27 Kasım, Bursa, Türkiye, ss: 140-141.

Manav T, Erdal M. 2017. Ceza infaz kurumu projelerinin maliyet-etkililik analizi ile değerlendirilmesi. TÜBAV Bilim, 10(3): 21-27.

Miranda SLC, Castillo EDR, Gonzalez V, Adafin J. 2022. Predictive analytics for early-stage construction costs estimation. Build, 12: 1043.

Özmaden MŞ, Erdal M. 2020. Konut yapılarının maliyet tahmininde kullanılan yöntemlerin performans analizi. Konya Müh Bil Derg, 8(4): 970-985.

Perera S, Watson I. 1998. Collaborative case-based estimating and design advances in engineering. Adv Eng Softw, 29(10): 801-808.

Phaobunjong K. 2002. Parametric cost estimating model for conceptual estimating of building construction projects. Faculty of Graduate School of Texas, Austin, USA, pp: 29.

Project Management Institute (PMI). 2016. Construction extension to the PMBOK® guide. Project Management Institute: Newtown Square, Pennsylvania, USA, 2nd ed., pp: 75.

Roney SF. 1992. Square foot type estimating for construction. AACE® International Professional Guid, Doc. No: 01, New York, USA, pp: 45.

Royal Institution of Chartered Surveyors. 2012. RICS new rules of measurement. In NRM 1, order of cost estimating and cost planning for capital building works. RICS, London, UK, pp: 48.

Saner C. 1993. 4-8 katlı konut yapılarında taşıyıcı sistem maliyetini tahmine yönelik bir yaklaşım önerisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, pp: 42.

Seyyar B. 2000. Bina tasarım sürecinde bilgisayar destekli maliyet tahmin sistemleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, pp: 90.

Singh R. 2019. Cost estimation methods in construction. URL: https://civilpanel.com/cost-estimation-methods-construction/ (Son erişim tarihi: 24 Haziran 2024).

Sueri M, Erdal M. 2022. Early estimation of sewerage line costs with regression analysis. Gazi Univ J Sci, 35(3): 822-832.

Topçu G. 1989. Yapı üretim sürecinde maliyet hesaplanmasına ilişkin işlemler: tahmin, planlama, kontrol. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, pp: 28.

Uğur L. O., Akdık M. M. 2017. İnşaat Sektöründe Maliyet Hesaplamalarında Kullanılan Birim Fiyat Analizlerinin Piyasa Fiyatlarıyla Karşılaştırılması, Yapı İşletmesi Araştırmaları, Alter Yayınları, Ankara, Türkiye, ss: 196-207.

Uğur LU. 2018. Yapı maliyeti çalışmaları. Alter Yayınları, Ankara, Türkiye, ss: 494.

Uğur LO, Kanit R, Erdal H, Namli E, Erdal Hİ, Baykan UN, Erdal M. 2019. Enhanced predictive models for construction costs: A case study of Turkish mass housing sector. Comput Econ, 53: 1403-1419.

Uğur LO, Penbe K. 2021. Comparison of the performance of "unit area cost method" (UACM) and "unit price method" (UPM) used in estimating the costs of the reinforced concrete multi-storey housing buildings. ICCAUA Proc, 4(1): 751-762.

Usta SH. 1994. Avan proje evresinde, bina maliyetinin bina elemanlarına dayalı olarak hesaplanması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, ss: 13.

Yaylagül N. 1994. Bina yapımında simülasyon yaklaşımıyla maliyet tahmini, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, ss: 22.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1579284

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Araştırma Makalesi (Research Article)
Cilt 8 - Sayı 3: 855-862 / Mayıs 2025
(Volume 8- Issue 3: 855-862 / May 2025)

BİR ELEKTRİKLİ ARAÇ LİTYUM İYON BATARYASININ DOĞAL TAŞINIM ŞARTLARINDA SOĞUTULMASININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Muhittin BİLGİLİ[1], Yunus Emre GÖNÜLAÇAR[1]*, Emre Aşkın ELİBOL[2]

[1]Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 06570, Ankara, Türkiye
[2]Giresun University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 28200, Giresun, Türkiye

Özet: Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan 10 Ah kapasitedeki bir Lityum Demir Fosfat (LFP) bataryanın, doğal taşınım şartları ve farklı deşarj hızları altındaki termal ve elektriksel performansı deneysel olarak incelenmiştir. Farklı deşarj hızlarında bataryanın yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi hem termal kamera kullanılarak görüntülenmiş hem de veri kaydedici yardımıyla kaydedilerek sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca bataryanın deşarjı sırasında batarya yüzeyinden çevre havaya olan ısı transfer hızları hesaplanmış, voltaj değişimleri ölçülmüş ve elde edilen bulgular grafiksel olarak sunulmuştur. Sonuç olarak deşarj hızının artmasıyla ortalama batarya yüzey sıcaklığı ve bataryadan çevreye olan ısı transfer hızının arttığı görülürken voltaj değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Deneysel bulgular 1C, 2C ve 3C deşarj hızlarındaki maksimum batarya yüzey sıcaklıklarının sırasıyla 37,3°C, 49,1°C ve 55,1°C olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla bataryayı doğal taşınımla soğutmanın yüksek deşarj hızları için (2C ve 3C) yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır. Deşarj hızının 1C'den 3C'ye çıkarılması maksimum ısı transfer hızını yaklaşık % 255 oranında arttırmıştır. Termal görüntülerden ve ısıl çift verilerinden elde edilen sonuçların maksimum %2,2'lik bir fark ile birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araç, Lityum iyon batarya, Doğal taşınım, Batarya termal yönetimi, Isı transferi

Experimental Investigation of Cooling of an Electric Vehicle Lithium Ion Battery Under Natural Convection Conditions

Abstract: In this study, the thermal and electrical performance of a 10 Ah Lithium Iron Phosphate (LFP) battery used in electric vehicles was experimentally investigated under natural convection conditions and different discharge rates. The changes in the surface temperatures of the battery with time at different discharge rates were both imaged using a thermal camera and recorded with the help of a data logger, and the results were compared with each other. In addition, the heat transfer rates from the battery surface to the ambient air during battery discharge were calculated, voltage changes were measured and the obtained findings were presented graphically. As a result, it was found that the average battery surface temperature and the heat transfer rate from the battery to the environment increased with the increase in the discharge rate, while the voltage value decreased. Experimental findings showed that the maximum battery surface temperatures at 1C, 2C and 3C discharge rates were 37.3°C, 49.1°C, and 55.1°C, respectively. Consequently, it was determined that natural convection cooling for the battery is insufficient for high discharge rates (2C and 3C). Increasing the discharge rate from 1C to 3C increased the maximum heat transfer rate by approximately 255%. Results from thermocouple data and thermal images were found to be consistent with each other, with a maximum difference of 2.2%.

Keywords: Electric vehicle, Lithium-ion battery, Natural convection, Battery thermal management, Heat transfer

***Sorumlu yazar (Corresponding author):** Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 06570, Ankara, Türkiye
E mail: yunusemre.gonulacar@gazi.edu.tr (Y. E. GÖNÜLAÇAR)
Muhittin BİLGİLİ https://orcid.org/0000-0003-0692-8646
Yunus Emre GÖNÜLAÇAR https://orcid.org/0000-0002-1565-8564
Emre Aşkın ELİBOL https://orcid.org/0000-0001-8573-6065

Gönderi: 04 Kasım 2024 **Kabul:** 13 Nisan 2025 **Yayınlanma:** 15 Mayıs 2025
Received: November 04, 2024 **Accepted:** April 13, 2025 **Published:** May 15, 2025
Cite as: Bilgili M, Gönülaçar YE, Elibol EA. 2025. Experimental ınvestigation of cooling of an electric vehicle lithium ıon battery under natural convection conditions. BSJ Eng Sci, 8(3): 855-862.

1. Giriş

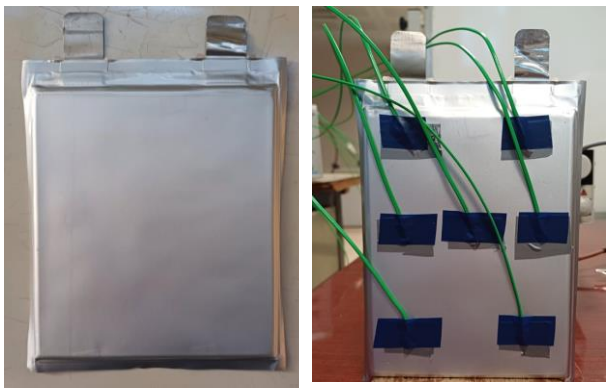
Dünya çapında sınırlı fosil enerji rezervleri ile küresel ısınmanın ve çevre kirliliğinin olumsuz etkileri, araştırmacıları mevcut fosil yakıt kaynaklarını çevre dostu ve temiz diğer alternatiflerle değiştirmeye yöneltmiştir (Can vd., 2022; Iqbal vd., 2023; Li vd., 2020). Çevre için zararlı olan sera gazı salınımlarının büyük bir kısmı, aşırı miktarda fosil yakıt kullanan geleneksel araç teknolojisi tarafından yayılmaktadır (Sikarwar vd., 2023). Fosil yakıttan kaçınılarak kirlilik miktarının küresel olarak neredeyse yüzde altmış oranında azaltılabileceği belirtilmektedir (Sikarwar vd., 2023). Günümüzde elektrikli araçlar, neredeyse ihmal edilebilir düzeyde kirletici emisyona sahip olduklarından kirlilik seviyelerinin azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmakta ve iklim değişiklikleri ve sera gazı emisyonlarına ilişkin küresel hedeflerin karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadırlar (Iqbal vd., 2023; Sikarwar vd., 2023; Youssef vd., 2020). Elektrikli araçlarda genellikle enerji kaynağı olarak hafıza etkisinin olmaması, büyük enerji yoğunluğu, düşük kendi kendine deşarj oranı ve uzun ömür gibi avantajları nedeniyle lityum iyon

bataryalar tercih edilmektedir (Iqbal vd., 2023; Monika vd., 2021; Youssef vd., 2020). Bununla birlikte, lityum iyon bataryalar yüksek hızlı şarj veya deşarj sırasında çok fazla ısı üretmektedir. Şarj ve deşarj döngüleri sırasında üretilen bu ısı zamanında uzaklaştırılamazsa, termal kaçağı tetikleyebilmekte ve hatta hücre patlamasına yol açabilmektedir (Iqbal vd., 2023; Panchal vd., 2016; Wu ve Rao, 2017). Öte yandan, günümüzün lityum-iyon bataryaları bile tamamen güvenli ekipman olarak kullanılamıyor iken, geleceğin daha yüksek performanslı bataryalarının, daha yüksek enerji ve güç yoğunlukları nedeniyle daha fazla güvenlik sorunu yaratacağı öngörülmektedir (Gümüşsu vd., 2017). Dolayısıyla elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon bataryaların güvenliği hayati bir konu haline gelmiştir. Lityum iyon bataryaların güvenli çalışma sıcaklığı 20℃ ile 60℃ arasında olmakla birlikte en iyi batarya performansı için optimum sıcaklık ise 25℃ ile 40℃ arasındadır (Abdelkareem vd., 2022; Iqbal vd., 2023). Bir lityum iyon bataryasının performansı optimum sıcaklık aralığının dışına çıktığında düşmeye başlamaktadır. Sıcaklık aralığının alt sınırının altında çalışmak, elektrokimyasal reaksiyonların yavaşlamasına neden olmakta ve böylece iç direnci arttırmaktadır (Bazinski vd., 2016). Sıcaklık sınırının üstünde çalışmak ise bataryanın kapasitesi ve performansını azaltmakta aynı zamanda termal kaçak olasılığının artmasına neden olmaktadır (Liao vd., 2022; Sikarwar vd., 2023). Ayrıca, batarya yüzeyindeki homojen olmayan sıcaklık dağılımı, bataryanın yaşlanma ritminde bozulmaya neden olmakta ve genel kapasitesini azaltmaktadır (Dilbaz vd., 2022; Sarchami vd., 2022). Sonuç olarak lityum iyon bataryaların ömrünü, etkinliğini ve kapasitesini arttırmak için uygun bir Batarya Termal Yönetim Sistemi (BTYS) gereklidir. Bu nedenle son yıllarda çok önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. BTYS, hücrelerde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar tarafından üretilen ısıyı kontrol etmek ve uzaklaştırmakla görevli bileşen olup bataryanın güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır (Iqbal vd., 2023; Li vd., 2022; Panchal vd., 2016). Bataryaları optimum sıcaklıkta tutmak için farklı türde BTYS yöntemleri mevcuttur (Jayabalan vd., 2022). Hava, sıvı ve faz değişim malzemesi (FDM) ile soğutma teknikleri BTYS'de yaygın olarak kullanılmaktadır. Hava tabanlı BTYS küçük alan gereksinimi, basit yapı ve ekonomik olması nedeniyle avantajlı hale gelmektedir. Hava tabanlı BTYS, doğal taşınım sürecine dayanan pasif hava soğutma sistemi ve zorlanmış taşınım kullanan aktif hava soğutma sistemi olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Doğal taşınımla soğutma, çalışma sırasında hiçbir dış enerji tüketmeyen, bir soğutma yöntemi olarak ön plana çıkmaktadır (Iqbal vd., 2023; Sikarwar vd., 2023). Literatürde lityum iyon bataryasının doğal taşınım şartlarında soğutulması ile ilgili bazı çalışmalar bulunmaktadır. Kalkan vd. (2021), LiFePO4 (LFP) torba tipi bir bataryanın 23℃ ortam sıcaklığında ve doğal taşınım koşullarında 1C-5C deşarj oranı aralığındaki termal performansı deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Farklı deşarj hızlarında bataryanın yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı dağılımı termal kamera kullanılarak görüntülenmiş, elde edilen deneysel sonuçlar sayısal sonuçlarla karşılaştırılmış ve her iki yöntemle batarya yüzeyinden geçen ısı transfer hızı belirlenmiştir. Sonuç olarak yüksek deşarj hızlarında batarya için doğal taşınım soğutmasının yeterli olmadığını ve deşarj oranıyla batarya yüzey sıcaklığının doğru orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Niculuţă ve Veje (2012) tarafından yapılan çalışmada, doğal taşınım şartları altında tek bir LFP tipi batarya hücresinin şarj ve deşarjı sırasındaki davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Hücrenin düşük bir akım değeri kullanılarak şarj/deşarj edildiğinde sıcaklık profilinin neredeyse homojen olduğu ancak daha yüksek akımlar için sıcaklık profilinin düzgün olmadığı ve hücrenin orta bölgesindeki yüzey sıcaklığının yüksek bir artışa sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca deneysel ve sayısal sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu vurgulanmıştır. Wang vd. (2019), doğal taşınımla soğutulan NCM (Ni, Co, Mn) tipi Li-iyon bataryanın termal davranışını deneysel bir yaklaşımla araştırmışlardır. Kızılötesi görüntüleme (IR) teknolojisi ile farklı deşarj oranları ve deşarj derinliği (DoD) için sıcaklık dağılımı elde etmişlerdir. Sonuçta katot tarafında ısı üretim oranının anot tarafına göre daha yüksek olduğunu, yüksek sıcaklık bölgesinin düşük hızlı deşarjda bataryanın merkezi iken yüksek hızlı deşarjda bataryanın üst kısmı olduğunu ve deşarj hızının artmasıyla sıcaklık farkının da arttığını göstermişlerdir. Gümüşsu vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, Li-iyon bataryaların doğal taşınım altındaki termal davranışını araştırmak için 3 boyutlu bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modeli geliştirilmiş ve hesaplamalı çözümdeki etkilerini ölçmek için makro ölçekli termofiziksel özellikler, bataryanın entropik terimi, kullanım geçmişi ve deşarj oranı analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları üzerinde özgül ısının önemli bir etkisinin olduğu ancak termal iletkenliğin nispeten küçük bir öneme sahip olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, tüm deşarj oranlarında batarya yüzey sıcaklığı açısından deneysel ve simülasyon sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu belirtilmiştir. Panchal vd. (2016) farklı deşarj oranlarının Li-iyon bataryanın termal ve elektriksel performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Termal kamera ile yapılan deneyler sırasında kızılötesi görüntüleri çekilmiş ve MATLAB Simulink kullanarak batarya için bir termal model oluşturulup doğrulanmıştır. Düşük deşarj hızlarında, batarya yüzey sıcaklığının ortam sıcaklığına yakın kaldığını, ancak yüksek deşarj hızlarında yüzey sıcaklığının hızla arttığını tespit etmişlerdir. Jayabalan vd. (2022), kanatçık gibi davranan alüminyum plakalarla Li-iyon bataryaların soğutulmasını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Bunun için yedi hücreli bir batarya paketi modeli oluşturup doğal ve zorlanmış taşınım durumlarını araştırmışlardır. Simülasyondaki doğal taşınımın, deneysel olana göre daha etkili olduğu ve alüminyum kanatçıklardan oluşan bir model kullanılarak batarya sistemindeki sıcaklık düşüşünün mümkün olduğu sonucuna varmışlardır. Youssef vd. (2021), prizmatik

NCM lityum-iyon batarya hücresinin doğal taşınım altında termal karakteristiğini ve davranışını deneysel olarak incelemişler ve üç boyutlu bir termal model oluşturarak sonuçları deneylerle doğrulamışlardır. Batarya yüzeyinin sıcaklık artışını ve dağılımını, değişken yükler ve başlangıç sıcaklık koşulları altında karşılaştırmışlardır. Sonuçta deneylerle elde edilen sıcaklık ile simülasyon arasındaki maksimum farkın 2℃'den az ve yüzeydeki sıcaklık artışının başlangıç sıcaklığıyla ters orantılı olduğunu vurgulamışlardır. Yine Youssef vd. (2020) tarafından yapılan diğer çalışmada NCM prizmatik lityum-iyon batarya hücresi için doğal taşınım şartlarında farklı ortam sıcaklığı koşullarında sayısal bir termal model geliştirilmiştir. Ayrıca termal kamera ve ısıl çiftler kullanılarak hücrenin yüzey sıcaklığı simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu termal modelleme sonuçları ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu ve maksimum sıcaklığın bataryanın merkez noktasında görüldüğü belirtilmiştir. Yang vd. (2021), NCM tipi prizmatik lityum-iyon bataryanın iç ve dış yüzeylerine ısıl çiftler yerleştirerek farklı soğutma şartlarındaki termal davranışını incelemişlerdir. Sonuç olarak maksimum sıcaklığın ve sıcaklık farkının deşarj oranıyla arttığını ve maksimum sıcaklık farkının meydana geldiği konumun bataryanın merkezi olduğunu belirtmişlerdir. Metallo (2024) yaptığı çalışmada, batarya soğutmada kullanılan hava bazlı sistemlerin ısı transfer katsayısını artırmak için yeni soğutucu gaz karışımları kullanmıştır. İnce, dikey silindirik bir konfigürasyonda doğal ve zorlanmış taşınımı değerlendirmek için kapsamlı bir FEM (Sonlu Elemanlar Metodu) modeli ve deneysel doğrulama gerçekleştirmiştir. Sonuçta geliştirdiği soğutucu karışımla ısı transfer katsayısının doğal taşınım sırasında yaklaşık %65 ve zorlanmış taşınım sırasında ise yaklaşık %80 arttığını vurgulamıştır. Iqbal vd. (2023), silindirik bir Li-iyon bataryasının yüksek şarj/deşarj hızlarında farklı soğutma teknikleri kullanılarak soğutulmasını deneysel olarak incelemişler ve buldukları sonuçları birbiriyle karşılaştırmışlardır. Doğal taşınım, zorlanmış taşınım ve faz değişim malzemesi (FDM) ile soğutma yöntemleri kullanarak gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda doğal taşınıma kıyasla zorlanmış taşınım ve FDM soğutması kullanıldığında hücre sıcaklığının daha fazla düştüğünü ve en etkili soğutmayı FDM ile elde ettiklerini belirtmişlerdir. Ma vd. (2024), daldırma sıvısı olarak çok bileşenli bir yağ kullanan tipik bir BTY (Batarya Termal Yönetimi) ünitesi tasarlamışlar ve doğal taşınımın etkisini karakterize etmek için üç boyutlu bir model geliştirmişlerdir. BTY modülünde doğal taşınımlı ve doğal taşınımsız durumların bir karşılaştırmasını yapmışlardır. Doğal taşınım etkisinin ısı dağılımını artırdığını söylemişlerdir. Behi vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada silindirik bir batarya modülünde soğutma ve sıcaklık dağılımını iyileştirmek için bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Hava soğutma ve ısı borusu içeren bir hibrit termal yönetim sistemi (TMS) sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçta doğal taşınımla soğutmaya kıyasla zorlanmış taşınım, ısı borusu ve bakır levhalı ısı borusu (HPCS) kullanan soğutma stratejisi için maksimum modül sıcaklığının azaltıldığı ve batarya modülünün sıcaklık dağılımının iyileştirildiği vurgulanmıştır. Yapılan bu çalışmada, 10 Ah kapasiteye sahip LFP torba tipi bataryanın doğal taşınım şartlarında soğutulması deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan deneylerde farklı deşarj hızlarının bataryanın yüzey sıcaklığına etkisi hem termal görüntüleme tekniği hem de ısıl çiftler yardımıyla ölçülmüştür. Deşarj işlemi süresince meydana gelen voltaj değişimleri kaydedilmiş ve incelenmiştir. Batarya yüzeyinden doğal taşınım ile çevreye olan ısı transfer hızları da hesaplanmış ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem

Doğal taşınım ile soğutma deneyleri 24℃ ortam sıcaklığında 1C, 2C ve 3C deşarj hızları için gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Şekil 1a'da gösterilen ve Tablo 1'de özellikleri verilen 10 Ah kapasitedeki Lityum Demir Fosfat torba tip batarya kullanılmıştır. Batarya her deneyden önce MARXLOW marka doğru akım (DC) güç kaynağı kullanılarak standart sabit akım - sabit voltaj (CC/CV) metodu ile 1C hızında tam şarj edilmiştir. Bataryanın boşaltma işlemi ise MERVESAN marka elektronik yük cihazı ile yapılmıştır. Tam dolu haldeki bataryanın (3,6 V) deşarj işlemi, 1C-3C aralığındaki hızlarda yapılmış ve deşarj kesme voltajı olan 2 V değerinde sonlandırılmıştır. Deşarj işlemi süresince batarya yüzey sıcaklıklarının termal görüntüleme işlemi TESTO marka termal kızılötesi kamera ile gerçekleştirilmiş ve bataryanın maksimum, minimum ve ortalama yüzey sıcaklıkları kamera yazılımı aracılığıyla belirlenmiştir. Termal kamera bir tripodun üzerine sabitlenmiş ve batarya yüzeyini görecek şekilde dik olarak yerleştirilmiştir. Ayrıca Şekil 1b'de görüldüğü gibi bataryanın yüzeyindeki farklı noktalara yedi adet K tipi ısıl çift konumlandırılmıştır. Bu ısıl çiftlerden alınan sıcaklık değerleri AGILENT marka veri kaydedici ve bilgisayar yardımıyla anlık olarak kaydedilmiştir. Bu veriler termal kameradan elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca ısıl çiftler kullanılarak elde edilen veriler ile her bir deşarj hızı için bataryadan çekilen ısı transfer hızları da hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan tüm ısıl çiftler buzlu suda ve kaynayan suda titizlikle kalibre edilmiştir. Deşarj işlemi süresince bataryanın voltaj değerleri, elektronik yük cihazı ile kaydedilmiştir. Çalışma kapsamında kurulan deney düzeneği Şekil 2'de görülmektedir.

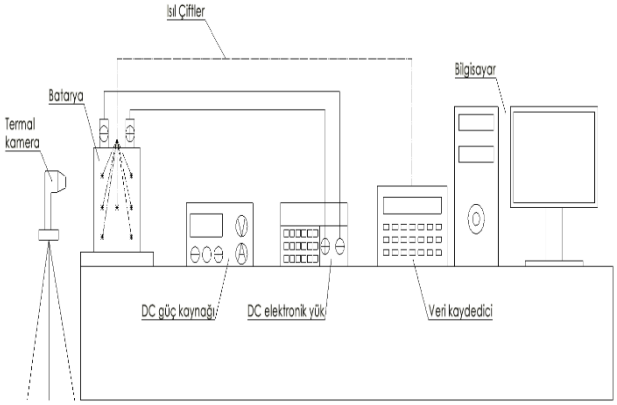


(a) (b)

Şekil 1. a) Torba tip batarya b) Batarya yüzeyine yerleştirilen ısıl çiftler.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan bataryanın özellikleri

Özellik	Değer
Marka/Model	GreenBatt / GLP10Ah
Anot/Katot malzemesi	Grafit / $LiFePO_4$
Nominal kapasite	10 Ah
Nominal voltaj	3,2 V
Şarj voltajı	3,6 V
Deşarj kesme voltajı	2 V
Çalışma sıcaklığı	-20°C - 55°C
Ağırlık	260 g
Ölçüler	6,2 x 126 x 183 mm



Şekil 2. Çalışmada kullanılan deney düzeneği.

Her bir deşarj hızı için, 24°C ortam sıcaklığında doğal taşınım ile soğutulan bataryadan çevre havaya transfer edilen ısı transfer hızını ($\dot{Q}$) hesaplamak için eşitlik 1'de verilen Newton'un soğuma yasası denklemi kullanılmıştır.

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (1)$$

Burada A_s bataryanın yüzey alanını (0,126 m x 0,183 m), T_s batarya yüzey sıcaklığını, T_∞ ortam sıcaklığını (24 °C) ve h ortalama ısı taşınım katsayısını belirtmekte olup, ortalama ısı taşınım katsayısı eşitlik 2'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$h = \frac{Nuk}{L_c} \quad (2)$$

Burada Nu Nusselt sayısını, k ısıl iletkenlik değerini ve L_c geometrinin karakteristik uzunluğunu (0,183 m) göstermektedir. Nusselt sayısını hesaplamak için Churchill ve Chu (1975) tarafından önerilen ve dikey plakaların yüzeyinde gerçekleşen doğal taşınım ile ısı transferi uygulamalarında sıkça tercih edilen Eşitlik 3'teki denklem kullanılmıştır.

$$Nu = \left\{ 0{,}825 + \frac{0{,}387 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + (0{,}492/Pr)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (3)$$

Bu denklemde Ra_L Rayleigh sayısını ve Pr Prandtl sayısını temsil etmektedir. Eşitlik 4'te ise Rayleigh sayısı (Ra_L), Grashof (Gr) ve Prandtl (Pr) sayılarının çarpımı olarak tanımlanmıştır (Çengel ve Ghajar, 2015).

$$Ra = GrPr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty){L_c}^3}{v^2} Pr \quad (4)$$

Burada g yerçekimi ivmesini (9,81 m/s²), β hacimsel genleşme katsayısını ($1/T_f$) ve v akışkanın kinematik viskozitesini göstermektedir. Eşitlik 3'te verilen bağıntı hem laminar hem de türbülanslı akış için geçerlidir. Mevcut çalışmada Grashof sayısı, bütün durumlarda dikey plakalar için kritik değer olan 10^9'dan küçük elde edildiğinden akış rejimi laminardır. Çalışma kapsamında yapılan deneyler üç defa tekrarlanarak belirsizlik hesabı yapılmıştır. Belirsizlik analizi için, ilk olarak Kline ve McClintock (1953) tarafından önerilen ve Eşitlik 5 ile gösterilen denklem kullanılmıştır.

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

Burada x_1, x_2, x_n ölçüm yapılan bağımsız değişkenler iken R bu değişkenlere göre hesaplanan bağımlı değişkendir. w_1, w_2, w_n ve w_R ise bu değişkenlerin belirsizlik miktarlarıdır. Sıcaklık ölçümünde kullanılan ısıl çiftlerin, termal kameranın ve voltaj ölçüm cihazının hassasiyetleri sırasıyla ±0,2°C, %±2 ve %±0,08'dir. Bu çalışmada bağımlı değişken olarak sadece bataryadan çevre havaya olan ısı transfer hızı ($\dot{Q}$) mevcut olup tüm durumlarda belirsizlik miktarının %3,8'den az olduğu belirlenmiştir.

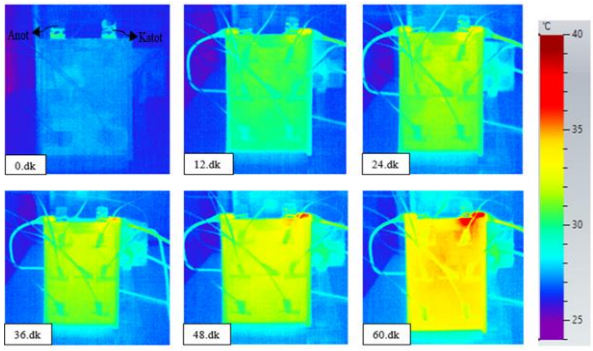
3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında deneyler 24°C ortam sıcaklığında üç farklı deşarj hızı (1C, 2C, 3C) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve batarya yüzey sıcaklığı, batarya yüzeyinden olan ısı transfer hızı ve voltaj değişimi incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda ayrı başlıklar altında sunulmuştur.

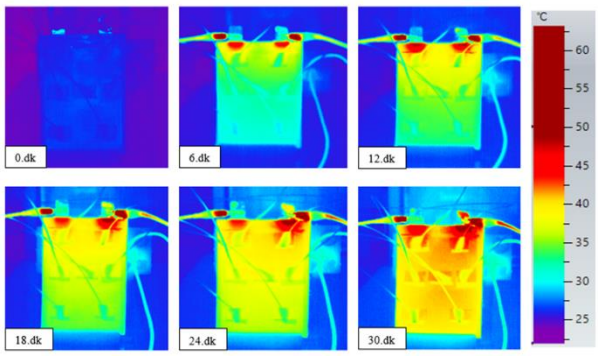
3.1. Termal Kamera Görüntüleri

Farklı deşarj hızları için LFP bataryanın zamana bağlı yüzey sıcaklığı dağılımını incelemek için termal görüntüleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 24°C ortam sıcaklığındaki batarya 1C-3C aralığındaki hızlarda deşarj edilerek yüzey sıcaklığının zamana göre değişimi termal kamera ile görüntülenmiş ve Şekil 3-5'te gösterilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, deşarj hızının artmasıyla bataryanın yüzey sıcaklığının da arttığı ve tüm

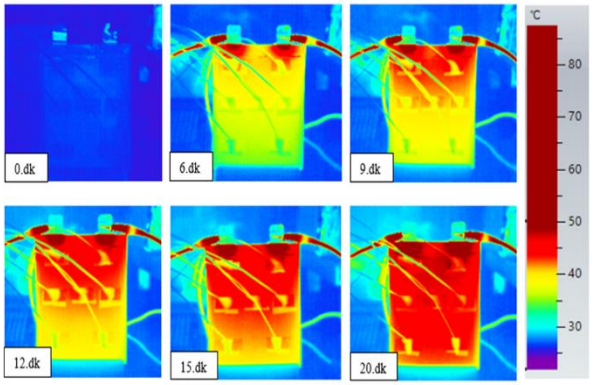
deşarj hızları için maksimum batarya yüzey sıcaklığına deşarj sonunda ulaşıldığı görülmektedir. Ayrıca 1C deşarj hızında batarya yüzeyindeki sıcaklık dağılımının 2C ve 3C hızlarına göre daha homojen olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek deşarj oranında tersinmez ısı baskın olup polarizasyon önemli ölçüde artmaktadır. Bu da ısı üretim hızının daha yüksek olmasına ve kısa deşarj süresinde batarya yüzeyinden uzaklaştırılamayan yoğun ısıya sebep olduğundan daha büyük bir sıcaklık gradyanına yol açmaktadır (Panchal vd., 2016; Wang vd., 2019). Şekil 3-5'e bakıldığında tüm deşarj hızlarında ısının yoğunlaştığı alanların bataryanın üst tarafındaki anot (negatif) ve katot (pozitif) bölgeleri olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni, bu sırada tersinmez ısının baskın olması ve iyon konsantrasyonu farkı ve yüksek çıkış akımı (elektron transferi) nedeniyle üst alanın ısı üretme oranının daha yüksek olması, joule ısısının ve polarizasyon ısısının çoğunun bataryanın üst kısmında yoğunlaşmasıdır (Panchal vd., 2016; Wang vd., 2019). Şekil 3-5'teki tüm görüntülere bakıldığında katot ucunun anot ucuna göre hep daha sıcak olduğu görülmektedir. Bu sıcaklık farkının nedeni katot ve anot malzemesinin elektriksel dirençlerinin farklı olmasıdır (Panchal vd., 2016; Pesaran, 2003; Wang vd., 2019). Her bir deşarj hızı için kamera yazılımı kullanılarak termal görüntülerden batarya yüzeyinin sıcaklığı belirlenmiştir. Şekil 3'te verilen 1C hızında boşaltılan bataryanın farklı zamanlardaki termal kamera görüntülerinden elde edilen sonuçlar ortalama batarya yüzey sıcaklığının 26,9°C'den 32,7°C'ye yükseldiğini ve deşarj sonunda ölçülen maksimum ve minimum sıcaklıkların sırasıyla 37,3°C ve 31,7°C olduğunu göstermektedir. 2C deşarj hızında batarya yüzeyinin termal kamera görüntülerinin verildiği Şekil 4 incelendiğinde, deşarj sonunda ölçülen ortalama ve maksimum batarya yüzey sıcaklıklarının sırasıyla 41,1°C ve 49,1°C olduğu görülmektedir. Şekil 5'te 3C hızındaki kamera görüntüleri, ortalama yüzey sıcaklığının başlangıçta 26,6°C iken deşarj sonunda 47,5°C'ye yükseldiğini ve maksimum yüzey sıcaklığının 55,1°C'ye ulaştığını göstermektedir.



Şekil 3. 1C deşarj hızında batarya yüzeyinin termal kamera görüntüleri.



Şekil 4. 2C deşarj hızında batarya yüzeyinin termal kamera görüntüleri.

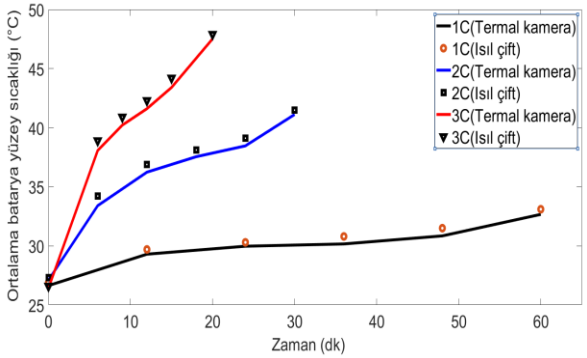


Şekil 5. 3C deşarj hızında batarya yüzeyinin termal kamera görüntüleri.

3.2. Termal Kamera ile Isıl Çift Verilerinin Karşılaştırılması

Termal görüntüler ve batarya yüzeyine konumlandırılan ısıl çiftlerden zamana bağlı sıcaklık verileri elde edilerek batarya yüzeyindeki ortalama sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır. Ortalama batarya sıcaklığının farklı deşarj hızları için zamana bağlı değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, deşarj hızının artmasıyla hem ortalama batarya yüzey sıcaklığının hem de maksimum sıcaklık farkının arttığı ve termal kamera ile ısıl çift sonuçlarının birbiriyle tutarlı olduğu görülmektedir. Tüm sonuçlar sayısal olarak değerlendirildiğinde maksimum %2,2'lik bir farkın olduğu belirlenmiştir. Bu fark, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'ten de görülebileceği gibi batarya yüzeyine konumlandırılan ısıl çiftler nedeniyle termal kameranın batarya yüzey sıcaklığını daha düşük ölçmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 6'dan anlaşılacağı üzere deşarj hızı arttıkça batarya deşarj süresi kısalmış ve tüm hızlar için deşarj işleminin sonuna doğru sıcaklık artışında bir ivmelenme olmuştur. Bu durum, deşarj işleminin sonunda bataryanın iç direncinin hızla artması ve tersinir ısı üretiminden kaynaklanmaktadır (Niculuţă ve Veje, 2012; Wang vd., 2019; Youssef vd., 2021). Ayrıca Şekil 6'ya bakıldığında, 1C deşarj hızında ortalama batarya yüzey sıcaklığının lityum iyon bataryalar için optimum çalışma sıcaklığı aralığını (25-40°C) aşmadığı ancak 2C ve 3C deşarj hızlarında bu sıcaklığın aşıldığı anlaşılmaktadır.

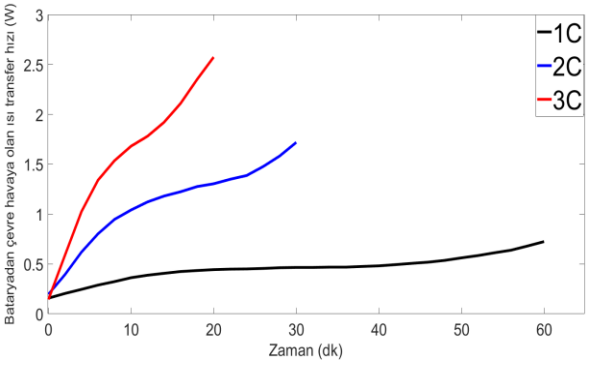
Dolayısıyla mevcut şartlarda 2C ve 3C deşarj hızları için doğal taşınımla soğutmanın yetersiz kaldığı söylenebilir.



Şekil 6. Farklı deşarj hızlarında ortalama batarya yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

3.3. Isı Transfer Hızı

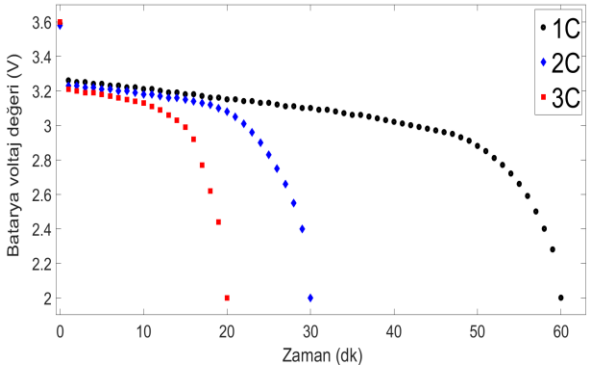
Bataryadan çevre havaya olan ısı transfer hızları hesaplanırken Eşitlik (1)'den yararlanılmıştır. MATLAB programına Materyal ve metot kısmında verilen tüm eşitlikler ve bilinen değişkenler girilerek her bir deşarj hızı için bataryadan çevre havaya olan ısı transfer hızları sayısal olarak hesaplanmış ve zamana bağlı değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, deşarj hızı ve deşarj süresinin artmasıyla bataryadan çevre havaya olan ısı transfer hızının da arttığı görülmektedir. Deşarj hızının artması, Şekil 6'dan da görülebileceği gibi ortalama batarya yüzey sıcaklığının artmasına ve dolayısıyla batarya yüzeyi ile ortam arasındaki sıcaklık farkının artışına neden olmaktadır. Ayrıca ısı taşınım katsayısının, yüzey ve ortam arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılı olduğu göz önüne alındığında, bataryadan çevre havaya olan ısı transfer hızının deşarj hızıyla artması beklenen bir durumdur (Kalkan vd., 2021). Maksimum ısı transfer hızları 1C, 2C ve 3C deşarj hızları için sırasıyla 0,724 W, 1,719 W ve 2,574 W olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla deşarj hızının 1C'den 3C'ye çıkarılması maksimum ısı transfer hızını yaklaşık % 255 oranında arttırmıştır.



Şekil 7. Farklı deşarj hızları için bataryadan çevreye olan ısı transfer hızının zamanla değişimi.

3.4. Voltaj Değişimi

Bataryanın deşarj işlemi süresince voltaj değişimi elektronik yük cihazı aracılığıyla kaydedilmiş ve zamana bağlı olarak Şekil 8'de verilmiştir. Batarya tam dolu iken yaklaşık 3,6 V voltaja sahipken bataryanın deşarj kesme voltajı olan 2 V'ta deşarj işlemi sonlandırılmıştır. Şekil 8 incelendiğinde tüm deşarj hızları için zamanla voltaj değerinin azaldığı ve özellikle deşarj işleminin sonuna doğru bu azalış miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca deşarj hızının artmasıyla hem voltaj değeri hem de deşarj süresi azalmıştır. Deşarj hızı arttıkça batarya voltaj değerinin daha fazla düşmesi ohmik, aktivasyon ve kütle transferi kayıplarının artması nedeniyledir (Panchal vd., 2016).



Şekil 8. Farklı deşarj oranlarında zamana bağlı batarya voltaj değişimi.

4. Sonuç

Bu çalışmada, doğal taşınım koşullarında soğutulan bir lityum iyon bataryasının farklı deşarj hızları altındaki ısıl ve elektriksel davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ve gelecekteki çalışmalar için öneriler aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

1) Deşarj hızıyla ortalama batarya yüzey sıcaklığı doğru orantılıdır. Maksimum batarya yüzey sıcaklığı, en yüksek deşarj hızı olan 3C'de ve tüm deşarj hızları için deşarj işleminin sonunda elde edilmiştir. Deşarj hızının 1C'den 3C'ye yükselmesiyle ortalama batarya yüzey sıcaklığında yaklaşık olarak % 44,7 artış meydana gelmiştir.

2) Mevcut çalışma şartları için doğal taşınımla soğutmanın düşük deşarj hızında (1C) yeterli olduğu görülürken daha yüksek deşarj hızlarında (2C ve 3C) batarya yüzey sıcaklığının maksimum sıcaklık sınırını aştığı ve bu hızlarda doğal taşınımla soğutmanın yetersiz olduğu tespit edilmiştir.

3) Deşarj hızının artmasıyla batarya yüzeyinden çevre havaya olan ısı transfer hızı da artmıştır.

3C deşarj hızındaki maksimum ısı transferinin 1C hızıyla kıyaslandığında yaklaşık % 255 oranında attığı görülmüştür.

4) Termal görüntüler ile ısıl çift verilerinden elde edilen sonuçların birbiriyle tutarlı olduğu görülmüştür. Ölçülen tüm sıcaklık sonuçları birbiriyle karşılaştırıldığında maksimum farkın %2,2 olduğu bulunmuştur.

5) Deşarj hızı ile hem batarya voltaj değeri hem de deşarj süresi ters orantılı olarak değişmektedir. Aynı şartlarda deşarj hızı arttıkça polarizasyon kayıplarına bağlı olarak batarya voltaj değeri azalmaktadır.

Günümüzde artan elektrikli araç sayısı ile birlikte batarya

kaynaklı ısınma ve yanma gibi olaylarla karşılaşılmaktadır. Bu çalışma ile elektrikli araç Li-iyon batarya tipi için doğal taşınımla soğutmaya dair bir araştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar gelecekte bir lityum iyon bataryasının soğutulmasını incelemeyi düşünen araştırmacılar için bilgilendirici niteliktedir. Ek olarak, farklı soğutma yöntemleri ve lityum iyon batarya tipleri gelecekteki araştırmalar için dikkate alınabilir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	M.B.	Y.E.G.	E.A.E.
K	20	20	60
T	40	30	30
Y	40	30	30
VTI	40	30	30
VAY	40	30	30
KT	20	60	20
YZ	30	50	20
KI	40	30	30
GR	40	40	20
PY	40	30	30
FA	50	50	0

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2023-8879 proje koduyla desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı kendilerine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Abdelkareem MA, Maghrabie HM, Abo-Khalil AG, Adhari OHK, Sayed ET, Radwan A, Olabi AG. 2022. Battery thermal management systems based on nanofluids for electric vehicles. J Energy Storage, 50: 104385.

Bazinski SJ, Wang X, Sangeorzan BP, Guessous L. 2016. Measuring and assessing the effective in-plane thermal conductivity of lithium iron phosphate pouch cells. Energy, 114: 1085-1092.

Behi H, Karimi D, Behi M, Ghanbarpour M, Jaguemont J, Sokkeh MA, Van Mierlo J. 2020. A new concept of thermal management system in Li-ion battery using air cooling and heat pipe for electric vehicles. Appl Therm Eng, 174: 115280.

Can A, Selimefendigil F, Öztop HF. 2022. A review on soft computing and nanofluid applications for battery thermal management. J Energy Storage, 53: 105214.

Çengel Y, Ghajar A. 2015. Heat and mass transfer. McGraw-Hill, New York, USA, 5th ed., pp: 533-577.

Churchill SW, Chu HHS, 1975. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. Int J Heat Mass Transf, 18(11): 1323-1329.

Dilbaz F, Selimefendigil F, Öztop HF. 2022. Lithium-ion battery module performance improvements by using nanodiamond-Fe3O4 water/ethylene glycol hybrid nanofluid and fins. J Therm Anal Calorim, 147(19): 10625-10635.

Gümüşsu E, Ekici Ö, Köksal M. 2017. 3-D CFD modeling and experimental testing of thermal behavior of a Li-Ion battery. Appl Therm Eng, 120: 484-495.

Iqbal U, Ali M, Khalid HA, Waqas A, Mahmood M, Ahmed N, Mehboob K. 2023. Experimental study to optimize the thermal performance of Li-ion cell using active and passive cooling techniques. J Energy Storage, 70: 108013.

Jayabalan J, Govindarajan M, Madhav VV, Sabareesaan KJ. 2022. Thermal management for green vehicle batteries under natural and forced convection modes. Curr Appl Sci Technol, 22(4): 1-21.

Kalkan O, Celen A, Bakirci K. 2021. Experimental and numerical investigation of the LiFePO4 battery cooling by natural convection. J Energy Storage, 40: 102796.

Kline S, McClintock F. 1953. Describing uncertainties in single-sample experiments. Mech Eng, 75: 3-8.

Li J, Zuo WEJ, Zhang Y, Li Q, Sun K, Zhang G. 2022. Multi-objective optimization of mini U-channel cold plate with SiO_2 nanofluid by RSM and NSGA-II. Energy, 242: 123039.

Li X, Zhang Z, Wang W, Tian Y, Li D, Tian J. 2020. Multiphysical field measurement and fusion for battery electric-thermal-contour performance analysis. Appl Energy, 262: 114518.

Liao G, Wang W, Zhang FEJ, Chen J, Leng E. 2022. Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system based on nanofluid. Appl Therm Eng, 216: 118997.

Ma R, Xuan W, Jiang Z, Wang D, Cao J, Xia F, Yu B, Wu D, Shi J, Chen J. 2024. Natural convection characteristics of novel immersion liquid applied to battery thermal management in static mode. J Energy Storage, 101: 113927.

Metallo A. 2024. Innovative approaches to optimizing Li-Ion battery cooling performance using gas mixtures. Appl Therm Eng, 257: 124472.

Monika K, Chakraborty C, Roy S, Dinda S, Singh SA, Datta SP. 2021. An improved mini-channel based liquid cooling strategy of prismatic LiFePO4 batteries for electric or hybrid vehicles. J Energy Storage, 35: 102301.

Niculuţă MC, Veje C. 2012. Analysis of the thermal behavior of a LiFePO4 battery cell. J Phys, 395(1): 012013.

Panchal S, Dincer I, Agelin-chaab M, Fraser R, Fowler M. 2016. Experimental and simulated temperature variations in a LiFePO4 -20 Ah battery during discharge process. Appl Energy, 180: 504-515.

Pesaran AA. 2003. Thermal characterization of advanced lithium-ion polymer cells. In: Third Advanced Automotive Battery Conference, June 10-13, Nice, France, pp: 1-7.

Sarchami A, Najafi M, Imam A, Houshfar E. 2022. Experimental study of thermal management system for cylindrical Li-ion battery pack based on nanofluid cooling and copper sheath. Int J Therm Sci, 171: 107244.

Sikarwar S, Kumar R, Yadav A, Gwalwanshi M. 2023. Battery thermal management system for the cooling of Li-Ion batteries, used in electric vehicles. Mater Today Proc, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.293.

Wang S, Li K, Tian Y, Wang J, Wu Y, Ji S. 2019. Infrared imaging investigation of temperature fluctuation and spatial

distribution for a large laminated lithium-ion power battery. Appl Therm Eng, 152(February): 204-214.

Wu F, Rao Z. 2017. The lattice Boltzmann investigation of natural convection for nanofluid based battery thermal management. Appl Therm Eng, 115: 659-669.

Yang X, Gao X, Zhang F, Luo W, Duan Y. 2021. Experimental study on temperature difference between the interior and surface of Li[Ni1/3Co1/3Mn1/3]O2 prismatic lithium-ion batteries at natural convection and adiabatic condition. Appl Therm Eng, 190: 116746.

Youssef R, He J, Akbarzadeh M, Jaguemont J, De Sutter L, Berecibar M, Van Mierlo J. 2020. Investigation of thermal behavior of large lithium-ion prismatic cell in natural air convection. In: Proceedings of the 9th International Conference on Applied Energy, September 27-30, Glasgow, UK, pp: 43-47.

Youssef R, Hosen MS, He J, Jaguemont J, Akbarzadeh M, De Sutter L, Berecibar M. 2021. Experimental and numerical study on the thermal behavior of a large lithium-ion prismatic cell with natural air convection. IEEE Trans Ind Appl, 57(6): 6475-6482.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1640556

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 863-874 / May 2025

COMPARISON OF IN VITRO AND HYDROPONIC SCREENING METHODS FOR NITROGEN EFFICIENCY IN PEPPER (*Capsicum annuum* L.)

Alim AYDIN[1*], Hasan PINAR[2], Firdes ULAŞ[2], Halit YETİŞİR[2] Mirac ŞAHİN[2] Hamide AYDIN[2]

[1]*Kırsehir Ahi Evran University, Faculty of Agriculture, Department of Horticulture, 40100, Kırsehir, Türkiye*
[2]*Erciyes University, Faculty of Agriculture, Department of Horticulture, 38000, Kayseri, Türkiye*

Abstract: In evaluations conducted under high and low nitrogen conditions, the morphological and physiological performance of pepper genotypes was compared across tissue culture and hydroponic systems. Under low nitrogen conditions, most genotypes showed similar rankings in both systems, indicating stable and environment-independent genotypic responses. Notably, 21 H-1-1, ERÜ 462, and ERÜ 457 consistently performed well across all traits, whereas 24-H-6, 29-H-10, and ERÜ 1248 ranked among the lowest-performing genotypes. In contrast, under high nitrogen conditions, genotypic performance varied more strongly depending on the cultivation system. Genotypes grown in tissue culture showed greater biomass accumulation and nitrogen uptake. While 21 H-1-1, ERÜ 462, and ERÜ 457 were among the top performers in tissue culture, their counterparts in hydroponic culture exhibited relatively lower performance. This indicates that system-specific effects play a more prominent role under high nitrogen supply. Considering both nitrogen levels, 21 H-1-1 and ERÜ 462 emerged as promising candidates for breeding programs due to their high nitrogen use efficiency and consistent performance across multiple environments. If a low-cost selection approach is desired, preliminary selection under low nitrogen conditions using tissue culture may be sufficient and effective for genotype differentiation.

Keywords: Root volume, Leaf area, Nitrogen efficiency, Inbred line

***Corresponding author:** Kırsehir Ahi Evran University, Faculty of Agriculture, Department of Horticulture, 40100, Kırsehir, Türkiye
E mail: alim.aydin@ahievran.edu.tr (A. AYDIN)
Alim AYDIN https://orcid.org/0000-0002-9424-5556
Hasan PINAR https://orcid.org/0000-0002-0811-8228
Firdes ULAS https://orcid.org/0000-0001-6692-8424
Halit YETİSİR https://orcid.org/0000-0001-6955-9513
Mirac SAHİN https://orcid.org/0000-0002-7699-6380
Hamide AYDIN https://orcid.org/0000-0002-0588-6192

Received: February 16, 2025
Accepted: April 13, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Aydın A, Pınar H, Ulaş F, Yetişir H, Şahin M, Aydın H. 2025. Comparison of in vitro and hydroponic screening methods for nitrogen efficiency in pepper (*Capsicum annuum* L.). BSJ Eng Sci, 8(3): 863-874.

1. Introduction

Chemical fertilizers are one of the most important input sources that directly affect plant growth, development and yield formation in both high-cost and low-cost agricultural systems. Since it is present in most plants in more amounts than all other mineral nutrients, nitrogen (N) is the source that is most utilized and needed in crop production in terms of quantity (Ulas et al. 2021a). N is found in the structure of many important organic compounds (amino acids, nucleic acids, proteins, enzymes, chlorophyll, ATP and ADP) (Matsuhisma et al. 2009) and the organic composition (sugar, starch, total nitrogen, cellulose) (Loudari et al. 2020; Prado, 2021; Kirkby, 2023). N affects the plant's architecture, chlorophyll formation and photosynthates allocation, flowering, and fruit development (Nawaz et al. 2017). A proper amount of N encourages root architecture, improvement in quality of fruits and regulates growth and development of plants as well as the uptake of other nutrients. In contrast, the obtainable N is often restricting plant growth and development more than any other nutrients under both high-input and low-input agriculture systems (Ulas et al. 2019). Excess N supply causes late ripening of fruits, leading to a decreased resistance to certain diseases (Bolat and Kara, 2017). On the other hand, under N deficiency there are several production problems accounting for low yield and quality of vegetable crops. As with all vegetable crops, plant growth and yield in pepper are very sensitive to N fertilizers. Tumbare and Tumbare, (2004) reported that nitrogen fertilizer increases fruit weight and yield. Madeira and De Varennes, (2005) observed that total chlorophyll content, leaf N concentration, and stems, leaves, and fruits dry weight of pepper increased with increasing N fertilization. Ulas et al. (2022) stated that leaf, and shoot fresh and dry weights, total leaf area, and leaf chlorophyll content (SPAD) of pepper plants were significantly increased with increasing N rate (3.0 mM N) than low N rate (0.3 mM N) under hydroponic conditions. Similar results were obtained in potato cultivars (Ulas et al. 2021a) and pepper inbred lines Ulas et al. (2022) under hydroponic conditions under two different N rates (Low-N: 0.5 mM N

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

and High-N: 3.0 mM N).

Nitrogen use efficiency (NUE) is in plants as the yield of harvestable product (dry matter)/ available soil N (or N supply) (Moll et al. 1982). Many researchers have shown that there are great differences among genotypes of the same species, especially in terms of N efficiency (N-uptake and N-use) (Schulte et al. 2007; Ulas et al. 2021a; Ulas et al. 2022). Determination of N-efficient genotypes from plant genetic resources and their exploitation in plant breeding programs is very important for sustainable crop production and N cycle. The determination of N-efficient genotypes depends on the genetic variation in genetic resources and the efficiency of the determination method. In a plant, NUE can be increased by genetic modification or plant breeding methods that can have very good N absorption from the soil and effective utilization (Hirel et al. 2007). So far, in many crop species genotypic variations have been studied such as maize (Machado and Fernandes, 2001), rice (Fageria and Baligar, 2003), tobacco (Ruiz et al. 2006), oilseed rape (Schulte et al. 2007), and pepper (Ulas et al. 2022), it was observed that developing crop varieties with improved NUE is the identification of key elements that control N assimilation processes (Ruiz et al. 2006). Because of this, investigations on N efficiency should be conducted to identify efficient, quick, accurate, and affordable screening techniques. Due to the lack of uniform nitrogen-treated fields and the labor-intensive and time-consuming nature of standard screening techniques, it is challenging to identify N-efficient genotypes. In vitro screening may be found tolerant plants and their tolerance level.

The development of tolerant plants has been the subject of numerous attempts following the success of in-vitro screening (Daneshmand et al. 2010; Soleimani et al. 2010; Homayoun et al. 2011). Murshed et al. (2015) screened nine potato cultivars under salt stress in vitro and reported that salt stress negatively affected plant growth and showed differences in the responses of the cultivars, and as a result in vitro screening could be used successfully. In addition to saving time and labor, the magnitude of the N effect depends on the plant species, variety and the N level. This study sets out to find the most effective, workable, long lasting and repeatable selection method for pepper plant nitrogen usage efficiency. Additionally, the physiological characteristics of various pepper genotypes were investigated by using high and low N administrations in tissue and hydroponic growing media.

2. Materials and Methods

2.1. Plant Material

In both Exp. 1 and 2, six pepper (*Capsicum annuum* L.) inbred lines (IL) (21-H-1-1, 29-H-10, 24-H-6, ERÜ 457, ERÜ 462, ERÜ 1248) were tested under low-N (0.3 mM N) and high-N (3.0 mM N) supply. For the comparison of results between the tissue culture and hydroponic culture environments, the data for the hydroponic culture were referenced from the study conducted by Ulas et al. (2021b).

2.2. Methods

2.2.1. Experiment I, in vitro screening

Before sowing, the pepper seeds utilized in the study underwent surface sterilization. To do this, pepper seeds were put in a glass jar with a cover, 70% ethyl alcohol was then added, and the mixture was then allowed to sit for one minute. By filtering ethyl alcohol and adding 5% commercial sodium hypochlorite, surface sterilization was carried out. Then, sterile distilled water was used to wash it three times. Pepper seeds were planted on a medium that also included Hoagland nutrient solution (Hoagland and Arnon 1950), which had low N (0.3 mM N) and high N (3.0 mM N) supplies. 330 ml glass jars were utilized for the tissue culture experiment, and an in vitro experiment with three replications and three plants in each replication was set up with the pH adjusted to 5.8. The experiment was conducted in a climate cabinet with a temperature of 25°C and 16/10-hour (light/dark) photoperiodic system for approximately six weeks.

2.2.2. Experiment II, hydroponic culture screening

The seeds were seeded in a multi-pot with a 2:1 mixture of peat (pH: 6.0-6.5) and perlite to create uniform seedlings for hydroponic growing medium. Carefully remove the seedlings with two true leaves from the peat-perlite growing media while avoiding root injury, they were then placed in 8 L plastic pots with a nutrient solution in a growth chamber. The nutritional medium was supplemented with 0.7% agar and 3% sucrose. The controlled growth chamber had an average day/night temperature of 25/22°C, a relative humidity range of 65-70%, and a photoperiod of 16/8 h of light/dark regimes that delivered roughly 350 mol m-2 s-1 of photon flux. A hydroponic experiment with four replications and three plants in each pot (replication) was set up using a totally randomized block design. The plants in the experiment received all their nutrients from an aerated hydroponic culture in 8 L plastic pots. Analytical grade (99% pure) ingredients were added to distilled water to create the nutrition solution using a modified Hoagland and Arnon, (1950). An air pump was used to continually aerate the nutrient solution in each 8 L pot. In hydroponic screenings, nitrogen was added at two different quantities (Low N: 0.3 mM, High N: 3.0 mM) using two different proportional N sources (Ca $(NO^3)^2$ at 75% and $(NH^4)2^SO^4$ at 25%) (Ulas et al. 2019). The composition of the basic nutritional solution was K^2SO^4 (500), KH^2PO^4 (250), $CaSO^4$ (1000), $MgSO^4$ (325), NaCl (50), H^3BO^3 (8), $MnSO^4$ (0.4), $ZnSO^4$ (0.4), $CuSO^4$ (0.4), $MoNa^2O^4$ (0.4), and Fe-EDDHA (80) (M). When the nutritional solution in the 3.0 mM N rate pots' N concentration dropped below 0.3 mM, as determined daily by nitrate test strips (Merck, Darmstadt, Germany) by using a NitracheckTM reflectometer, all nutrients were replenished.

2.2.3. Harvest, shoot and root dry weight and main stem length measurements

42 days after treatment (DAT) in both cases, three plants per pot were collected. Roots and shoots from harvested plants were divided. The shoot was divided into leaf, stem,

and roots to calculate the fresh and dry weight. To calculate dry weights, plant materials were dried in a forced-air oven for 48 hours at 70°C. Using a leaf-area meter (LI-3100, LI-COR. Inc. Lincoln, NE, USA), the plants' leaves were measured destructively during the harvesting process in both studies. The total leaf area was calculated from cm2 to m^2 (cm^2). Using a ruler, the main stem's length (cm) was determined.

2.2.4. Root morphological measurements

The root volume (cm^3) and total root length (m) of the plants were measured in both experiments using an Epson Expression 11000XL scanner and the specialized image analysis software WinRHIZO (Win/Mac RHIZO Pro V. 2002c Regent Instruments Inc. Québec, QC G1V 1V4, Canada). Approximately 5.0 g of fresh root samples were collected from each harvested sample. The samples were positioned in the tray of the scanner. The roots were evenly distributed around the tray after water was introduced, using plastic forceps, and scanning and analysis were carried out using the WinRhizo system's user interface on a computer linked to the scanner. The ratio of the total plant root length to the total plant root volume was then calculated (Ulas et al. 2019).

2.2.5. Shoot nitrogen analysis

After grinding shoot dry materials, 200 mg from each dry plant samples were taken to analyze the shoot N concentration (mg N g^{-1} d.w.) by using Kjeldahl Nitrogen Determination Method, introduced by Johan Kjeldahl in 1883 (Kjeldahl 1883). After the determination of shoot N concentration, the value was multiplied by total shoot dry matter to calculate the total shoot N content (N uptake) of a whole plant (mg N $plant^{-1}$) (Ulas et al. 2019).

2.3. Statistical Analysis

All statistical analyses, including correlation assessments and principal component analysis (PCA), as well as the generation of graphical outputs, were conducted using Minitab Statistical Software (version 22).

3. Results

Among the pepper genotypes tested, ERÜ 462 and ERÜ 457 exhibited the highest main stem lengths under both tissue culture and hydroponic culture conditions. These genotypes consistently outperformed others under both low and high nitrogen treatments (Figure 1 a). Correlation analysis showed that the relationship between the two growing systems varied depending on nitrogen level. Under low nitrogen conditions, a moderate positive correlation was observed between tissue and hydroponic cultures (r = 0.617, Figure 1 b), whereas under high nitrogen, the correlation was stronger (r = 0.875, Figure 1 c). These results indicate that genotype responses became more parallel between the two systems when nitrogen was not limiting.

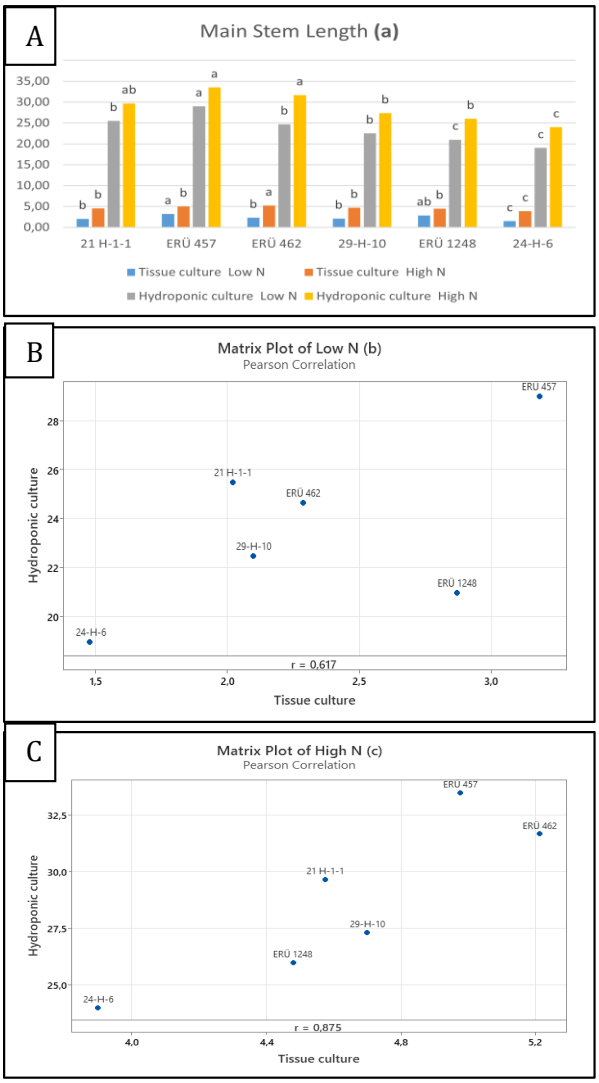


Figure 1. (a) Main stem lengths of pepper genotypes grown under different nitrogen levels (low and high N) in tissue culture (cm) and hydroponic culture (cm) conditions; (b) correlation between tissue culture and hydroponic culture under low nitrogen conditions, and (c) correlation between the two culture systems under high nitrogen conditions. Means that do not share a letter are significantly different.

Among the pepper genotypes tested, 21 H-1-1 and 29-H-10 exhibited the highest shoot fresh weights under both tissue culture and hydroponic culture conditions. These genotypes showed superior biomass accumulation, particularly under high nitrogen conditions (Figure 2 a). Correlation analysis revealed that the relationship between the two cultivation systems varied based on nitrogen availability. Under low nitrogen conditions, a strong positive correlation was observed between tissue and hydroponic cultures (r = 0.897, Figure 2 b), indicating consistent genotype responses across systems. However, under high nitrogen conditions, the correlation weakened (r = 0.459, Figure 2 c), suggesting that genotype performance diverged more between the two systems when nitrogen was abundant. These findings indicate that shoot biomass production is more stable across growing

environments under nitrogen-limited conditions, whereas high nitrogen may reveal system-specific differences in genotype response.

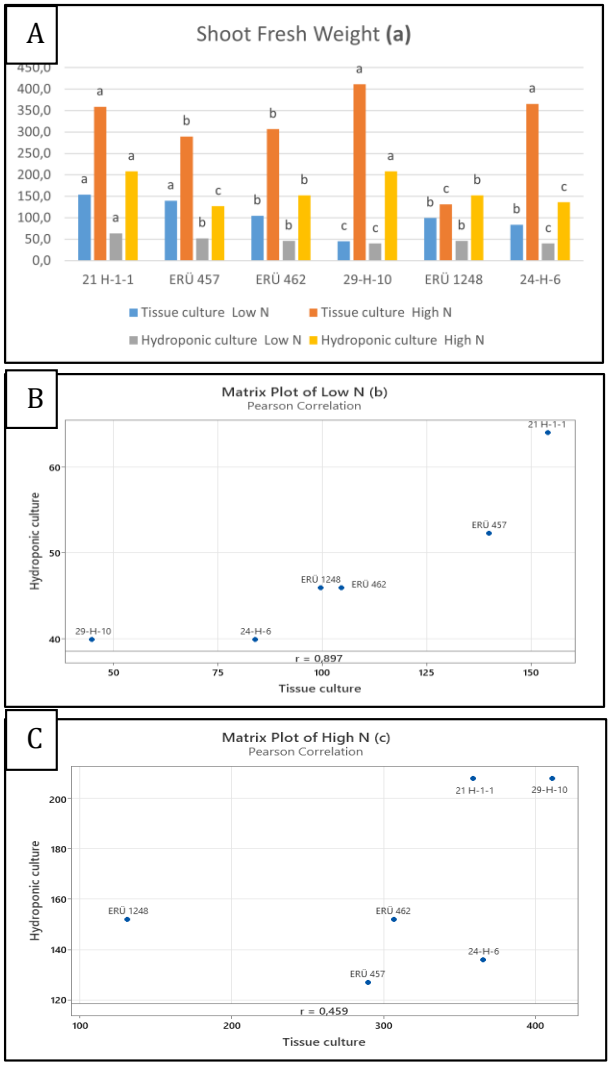


Figure 2. (a) Shoot fresh weight of pepper genotypes grown under different nitrogen levels (low and high N) in tissue culture (mg) and hydroponic culture (g) conditions; (b) correlation between tissue culture and hydroponic culture under low nitrogen conditions, and (c) correlation between the two culture systems under high nitrogen conditions. Means that do not share a letter are significantly different.

Among the pepper genotypes tested, 21 H-1-1 and 29-H-10 exhibited the highest shoot dry weights under both tissue culture and hydroponic culture conditions (Figure 3 a). Correlation analysis between the two culture systems revealed a moderate positive relationship under low nitrogen conditions (r = 0.728, Figure 3 b), suggesting a relatively consistent genotype response across systems when nitrogen was limited. However, under high nitrogen conditions, the correlation dropped substantially (r = 0.287, Figure 3 c), indicating greater variability in genotype performance between systems when nitrogen was abundant. These results suggest that shoot dry weight is more consistently expressed across different cultivation systems under nutrient-limited conditions, while high nitrogen availability may enhance the influence of environmental or system-specific factors on genotype performance.

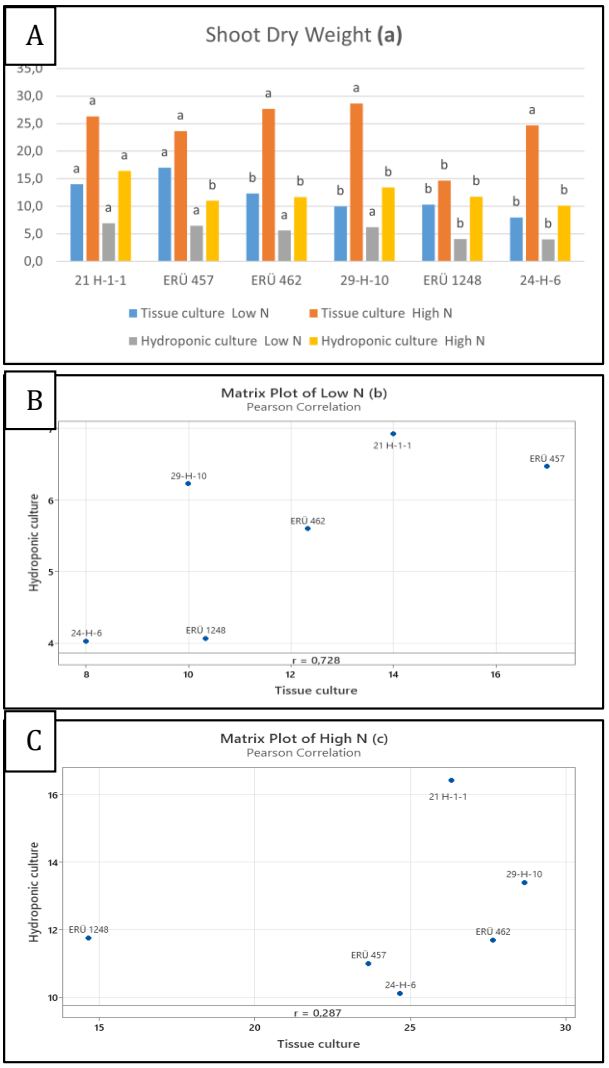


Figure 3. (a) Shoot dry weight of pepper genotypes grown under different nitrogen levels (low and high N) in tissue culture (mg) and hydroponic culture (g) conditions; (b) correlation between tissue culture and hydroponic culture under low nitrogen conditions, and (c) correlation between the two culture systems under high nitrogen conditions. Means that do not share a letter are significantly different.

21 H-1-1 and ERÜ 462 exhibited the highest root fresh weights under both tissue culture and hydroponic culture conditions (Figure 4 a). These genotypes accumulated greater root biomass, particularly under high nitrogen conditions. Correlation analysis showed that the relationship between the two cultivation systems varied with nitrogen availability. Under low nitrogen conditions, a moderate positive correlation was observed between the systems (r = 0.552, Figure 4 b), indicating a reasonably consistent root growth response across environments.

However, under high nitrogen conditions, the correlation slightly increased to r = 0.690 (Figure 4 c), reflecting a somewhat stronger alignment of genotype performance between the systems compared to low nitrogen. These results suggest that, unlike shoot dry weight, root fresh weight responses may become more aligned between systems as nitrogen increases, possibly due to more uniform root development conditions under non-limiting nutrient availability.

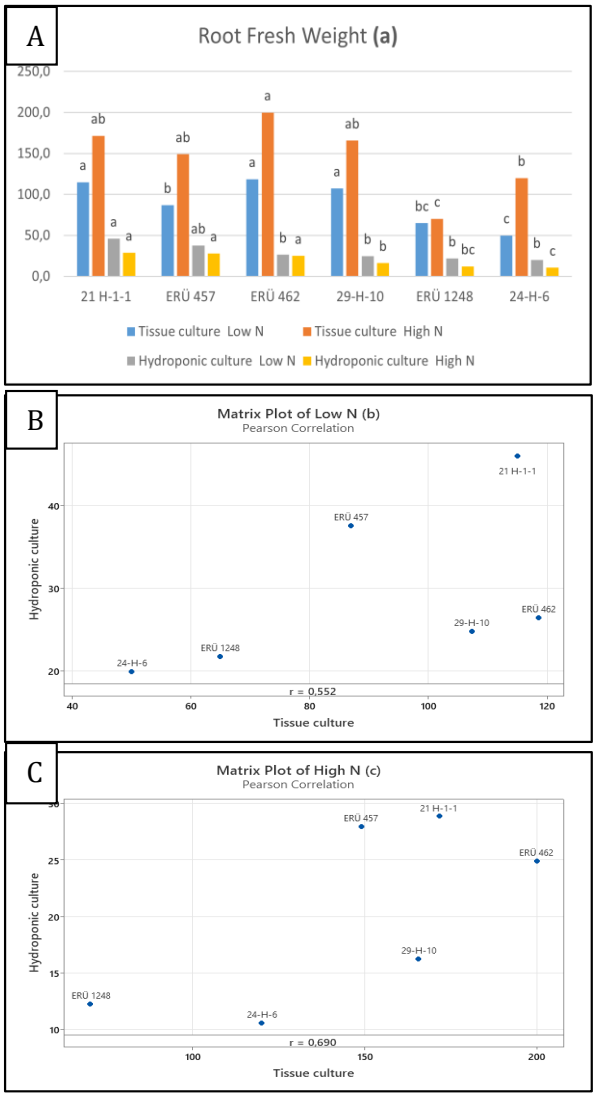


Figure 4. (a) Root fresh weight of pepper genotypes grown under different nitrogen levels (low and high N) in tissue culture (mg) and hydroponic culture (g) conditions; (b) correlation between tissue culture and hydroponic culture under low nitrogen conditions, and (c) correlation between the two culture systems under high nitrogen conditions. Means that do not share a letter are significantly different.

21 H-1-1, ERÜ 457, and ERÜ 462 showed the highest root dry weights under both tissue culture and hydroponic culture conditions (Figure 5 a). Correlation analysis revealed that the relationship between the two growing systems varied depending on nitrogen availability. Under low nitrogen conditions, the correlation between tissue culture and hydroponic systems was very weak (r = 0.207, Figure 5 b), indicating inconsistent genotype performance across systems when nitrogen was limited. However, under high nitrogen conditions, the correlation increased notably to r = 0.809 (Figure 5 c), reflecting a stronger alignment between the two systems and suggesting that genotype responses became more comparable when nitrogen was not a limiting factor. These results imply that root dry weight accumulation is more variable between systems under nutrient-limited conditions, while under sufficient nitrogen availability, genotype performance becomes more stable and parallel between tissue and hydroponic culture environments.

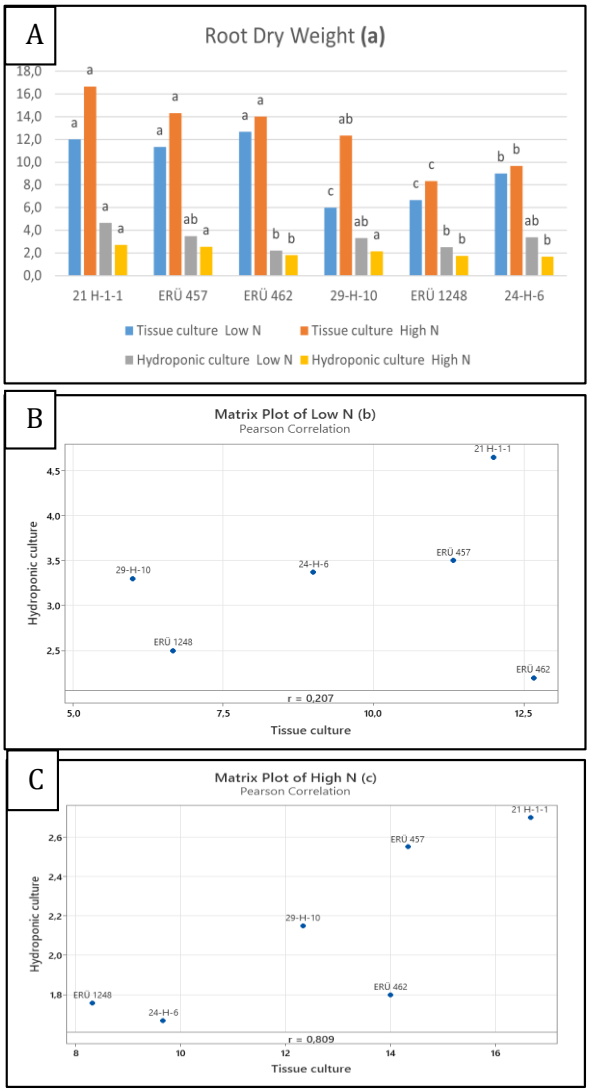


Figure 5. (a) Root dry weight of pepper genotypes grown under different nitrogen levels (low and high N) in tissue culture (mg) and hydroponic culture (g) conditions; (b) correlation between tissue culture and hydroponic culture under low nitrogen conditions, and (c) correlation between the two culture systems under high nitrogen conditions. Means that do not share a letter are significantly different.

Among the pepper genotypes tested, 21 H-1-1 and ERÜ 457 displayed the highest leaf area values under both tissue culture and hydroponic culture conditions (Figure 6 a). Particularly under high nitrogen conditions. Correlation analysis between the two growing systems revealed that the relationship strengthened under high nitrogen availability. Under low nitrogen conditions, the correlation between tissue culture and hydroponic systems was weak (r = 0.379, Figure 6 b), indicating variable genotype performance between the systems when nitrogen was limited. In contrast, under high nitrogen conditions, the correlation increased to r = 0.843 (Figure 6 c), suggesting a strong and consistent response across both systems when nitrogen was sufficiently available.

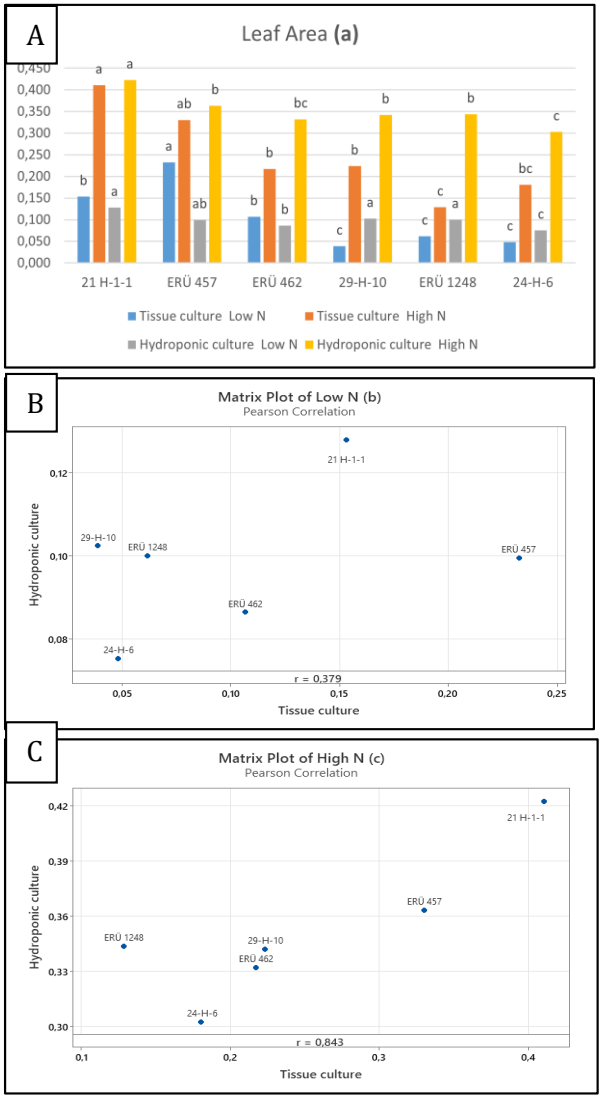


Figure 6. (a) Leaf area of pepper genotypes grown under different nitrogen levels (low and high N) in tissue culture (cm^2) and hydroponic culture (m^2) conditions; (b) correlation between tissue culture and hydroponic culture under low nitrogen conditions, and (c) correlation between the two culture systems under high nitrogen conditions. Means that do not share a letter are significantly different.

Among the pepper genotypes evaluated, 21 H-1-1, ERÜ 457, and ERÜ 462 exhibited the greatest root lengths under both tissue culture and hydroponic culture conditions (Figure 7 a). Correlation analysis showed that the relationship between the two growing systems was stronger under low nitrogen conditions (r = 0.758, Figure 7 b) compared to high nitrogen conditions (r = 0.610, Figure 7 c). This indicates that genotype performance in terms of root elongation was more consistent between the two systems when nitrogen availability was limited, whereas increased nitrogen levels may have introduced system-specific variability. These findings suggest that root length is a relatively stable trait across different cultivation systems, particularly under nutrient-deficient conditions. However, under high nitrogen availability, environmental or system-specific factors may play a more pronounced role in determining genotype performance.

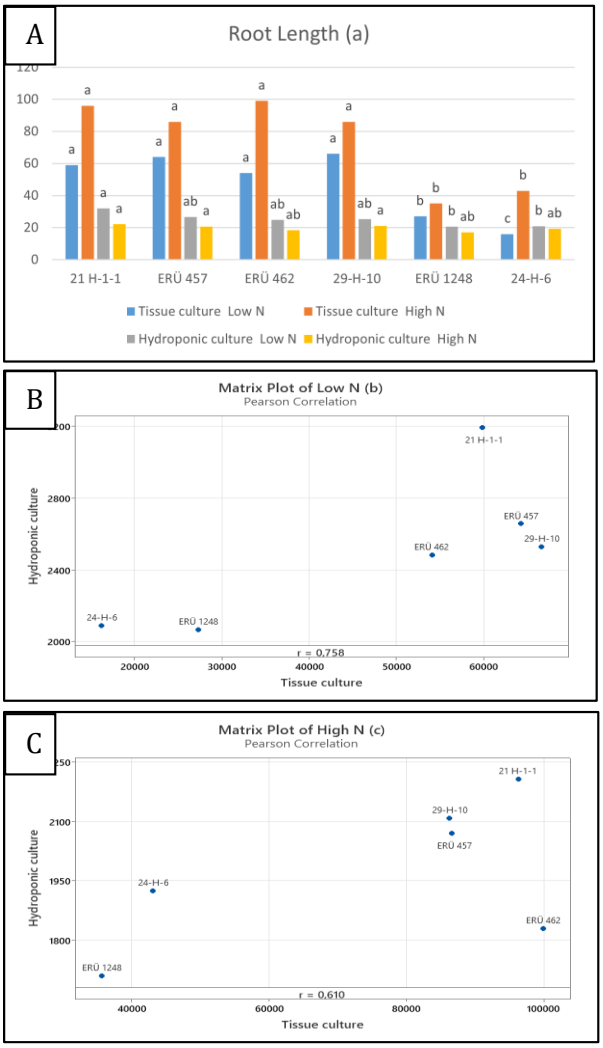


Figure 7. (a) Root lenght of pepper genotypes grown under different nitrogen levels (low and high N) in tissue culture (cm) and hydroponic culture (m) conditions; (b) correlation between tissue culture and hydroponic culture under low nitrogen conditions, and (c) correlation between the two culture systems under high nitrogen conditions. Means that do not share a letter are significantly different.

Root diameter measurements showed relatively small variation across genotypes and nitrogen levels in both tissue and hydroponic culture systems (Figure 8 a). Although genotypes such as 21 H-1-1, ERÜ 457, and ERÜ 462 tended to have slightly greater root diameters. Correlation analysis revealed a moderate positive relationship between the two systems under low nitrogen conditions (r = 0.682, Figure 8 b), suggesting some consistency in genotype responses for this trait when nitrogen was limited. However, under high nitrogen conditions, the correlation weakened significantly (r = 0.356, Figure 8 c), indicating increased variability in root diameter across systems in response to nitrogen enrichment.

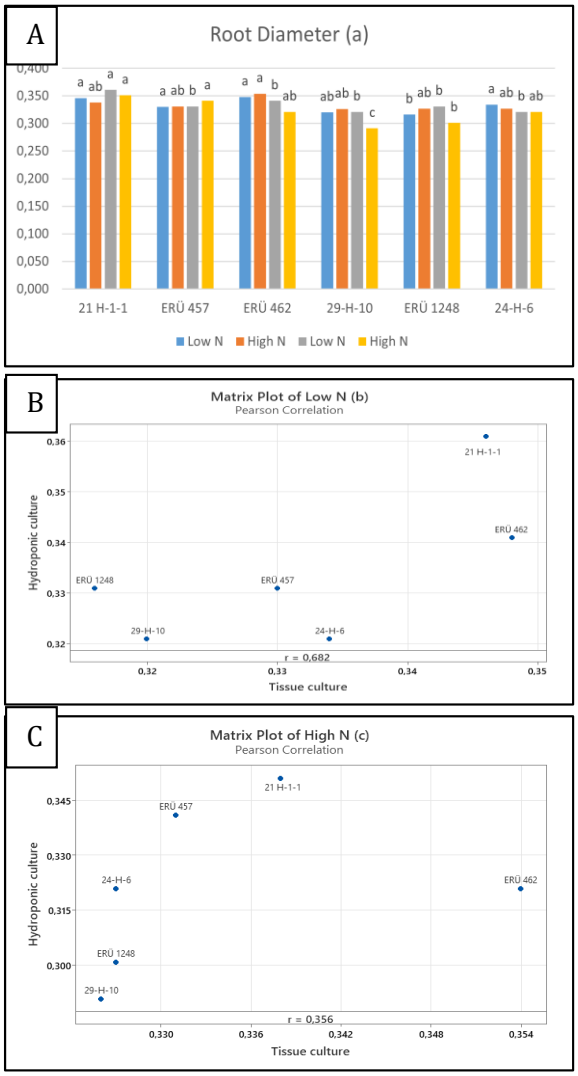


Figure 8. (a) Root diamater of pepper genotypes grown under different nitrogen levels (low and high N) in tissue culture (mm) and hydroponic culture (mm) conditions; (b) correlation between tissue culture and hydroponic culture under low nitrogen conditions, and (c) correlation between the two culture systems under high nitrogen conditions. Means that do not share a letter are significantly different.

Root volume varied considerably between genotypes and cultivation systems, with notably higher values recorded in hydroponic culture compared to tissue culture under both nitrogen conditions (Figure 9 a). Correlation analysis showed a moderate positive relationship between tissue culture and hydroponic culture under low nitrogen conditions (r = 0.641, Figure 9 b), suggesting some consistency in genotype responses. However, the correlation became stronger under high nitrogen conditions (r = 0.890, Figure 9 c), indicating that root volume responded more similarly across systems when nitrogen was not a limiting factor.

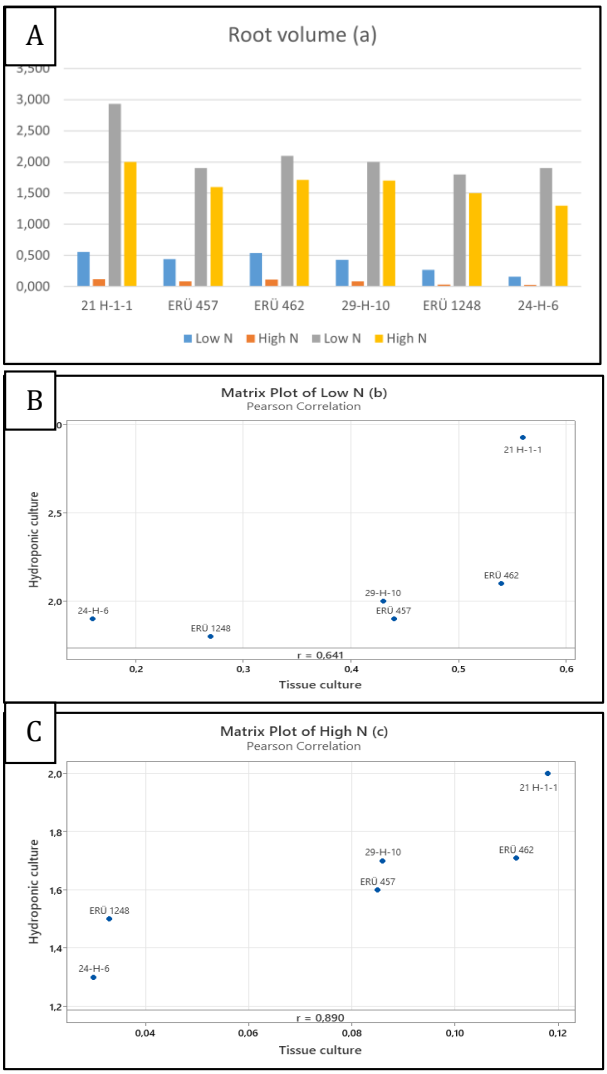


Figure 9. (a) Root volüme of pepper genotypes grown under different nitrogen levels (low and high N) in tissue culture (m^3x100) and hydroponic culture (m^3) conditions; (b) correlation between tissue culture and hydroponic culture under low nitrogen conditions, and (c) correlation between the two culture systems under high nitrogen conditions. Means that do not share a letter are significantly different.

Nitrogen (N) concentration in pepper plants showed clear differences between nitrogen treatments and cultivation systems (Figure 10 a). Higher nitrogen concentrations

were observed under high N conditions across all genotypes, with especially elevated levels in the hydroponic system. 21 H-1-1, ERÜ 457, and ERÜ 462 tended to accumulate more nitrogen. Correlation analysis revealed a strong positive relationship between tissue and hydroponic culture systems under low nitrogen conditions (r = 0.814, Figure 10 b), suggesting consistent nitrogen uptake behavior across systems when nitrogen was limited. However, under high nitrogen conditions, this correlation decreased sharply to r = -0.115 (Figure 10 c), indicating that genotype responses to nitrogen availability diverged between systems when nitrogen was abundant.

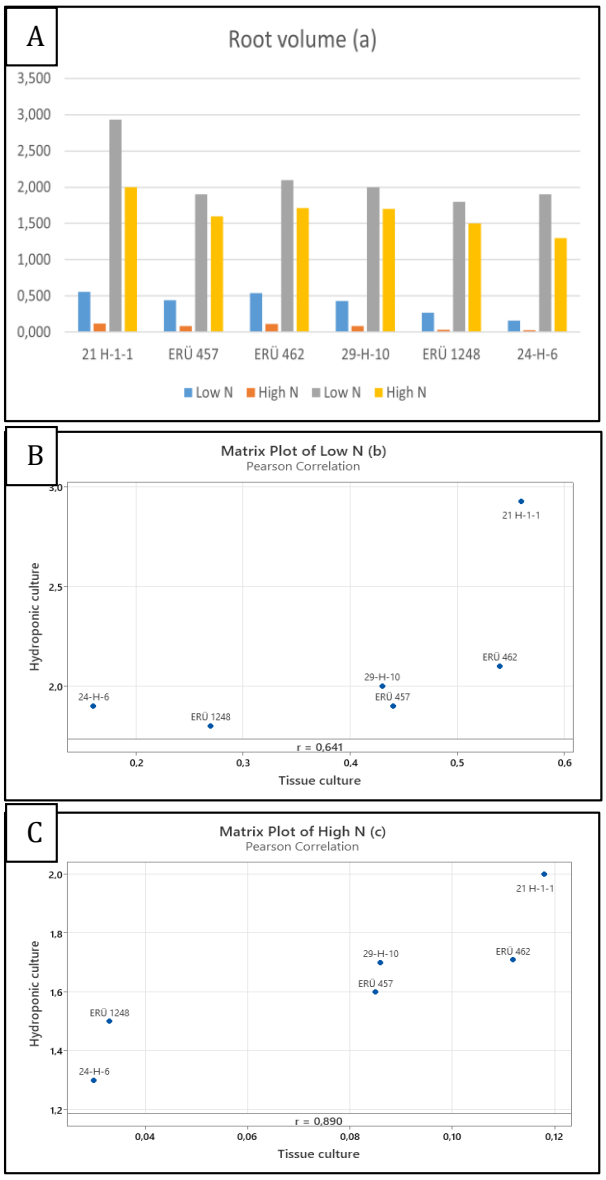


Figure 9. (a) Root volüme of pepper genotypes grown under different nitrogen levels (low and high N) in tissue culture (m^3x100) and hydroponic culture (m^3) conditions; (b) correlation between tissue culture and hydroponic culture under low nitrogen conditions, and (c) correlation between the two culture systems under high nitrogen conditions. Means that do not share a letter are significantly different.

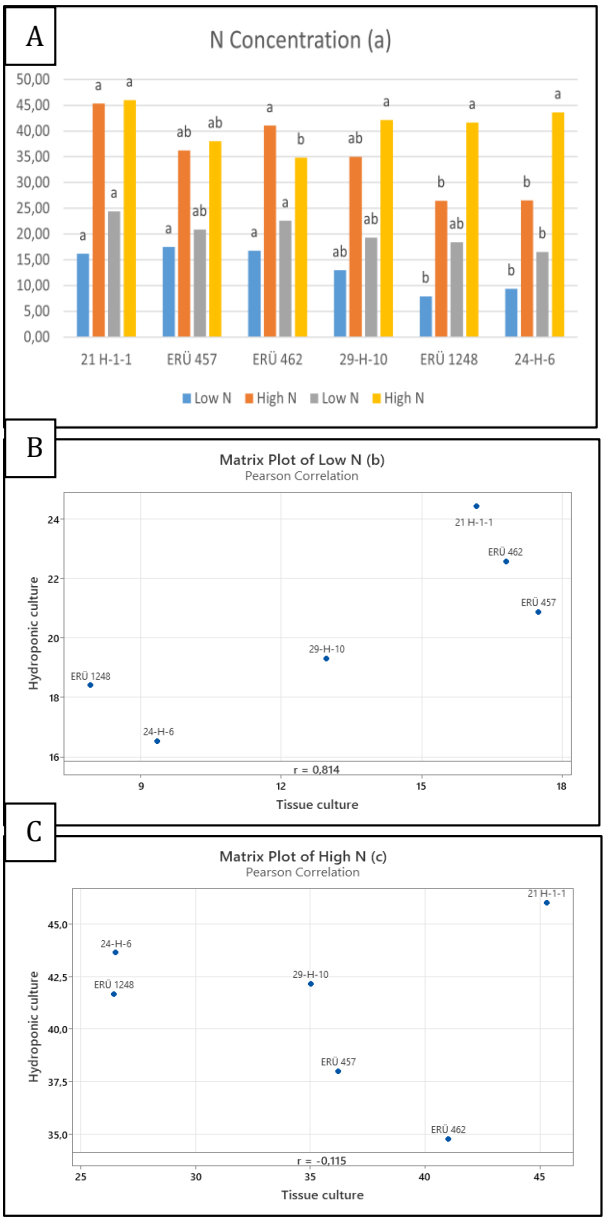


Figure 10. (a) N concentration of pepper genotypes grown under different nitrogen levels (low and high N) in tissue culture (mg g^{-1} DW) and hydroponic culture (mg g^{-1} DW) conditions; (b) correlation between tissue culture and hydroponic culture under low nitrogen conditions, and (c) correlation between the two culture systems under high nitrogen conditions. Means that do not share a letter are significantly different.

Total nitrogen (N) content varied notably across genotypes and growing systems, with significantly higher values recorded under high nitrogen supply in both tissue culture and hydroponic culture conditions (Figure 11 a). 21 H-1-1, ERÜ 457, and ERÜ 462 exhibited the highest total N accumulation, particularly under high nitrogen levels. Correlation analysis showed a moderate positive relationship between tissue and hydroponic systems under low nitrogen conditions (r = 0.669, Figure 11 b), indicating a fair level of consistency in total N accumulation across environments when nitrogen was limited. However, under high nitrogen conditions, the

correlation weakened (r = 0.349, Figure 11 c), suggesting increased variation in genotype responses depending on the cultivation system.

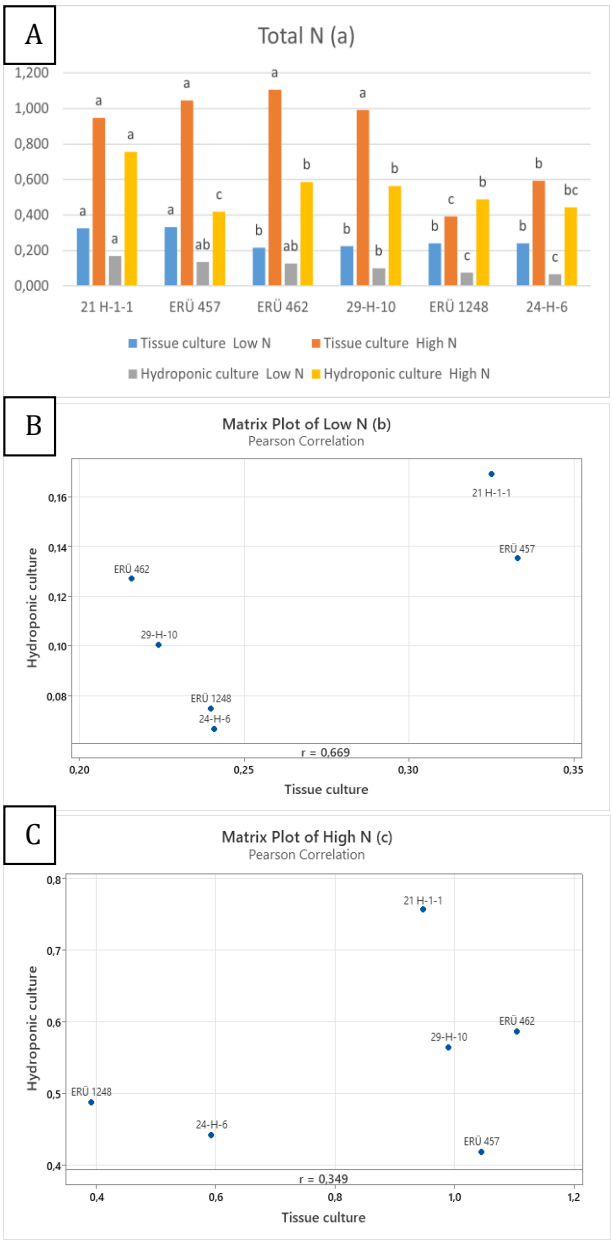


Figure 11. (a) Total N of pepper genotypes grown under different nitrogen levels (low and high N) in tissue culture (mg g^{-1} DW) and hydroponic culture (mg g^{-1} DW) conditions; (b) correlation between tissue culture and hydroponic culture under low nitrogen conditions, and (c) correlation between the two culture systems under high nitrogen conditions. Means that do not share a letter are significantly different.

3.1. Evaluation of Genotypic Consistency Across Growing Systems (Under Low Nitrogen Conditions)

Under low nitrogen conditions, a comparison of all measured traits—including main stem length, shoot/root fresh and dry weight, root length, leaf area, root volume, nitrogen concentration, and total nitrogen—revealed that genotypes with high and low values generally showed similar rankings in both tissue culture and hydroponic systems. This indicates that genotypic responses to low nitrogen availability were stable and largely independent of the cultivation environment. Notably, 21 H-1-1, ERÜ 462, and ERÜ 457 consistently demonstrated high performance across multiple parameters in both systems under low nitrogen. Conversely, 24-H-6, 29-H-10 and ERÜ 1248 exhibited limited development, ranking among the lowest-performing genotypes in both conditions. These findings suggest that, under nitrogen-deficient conditions, the influence of environmental factors on genotype selection is limited, and that high-performing genotypes can maintain consistent performance across different production systems. Therefore, these genotypes can be considered as promising candidates for use in breeding programs and nitrogen management studies, particularly in systems where multi-environment stability is essential (Figure 12).

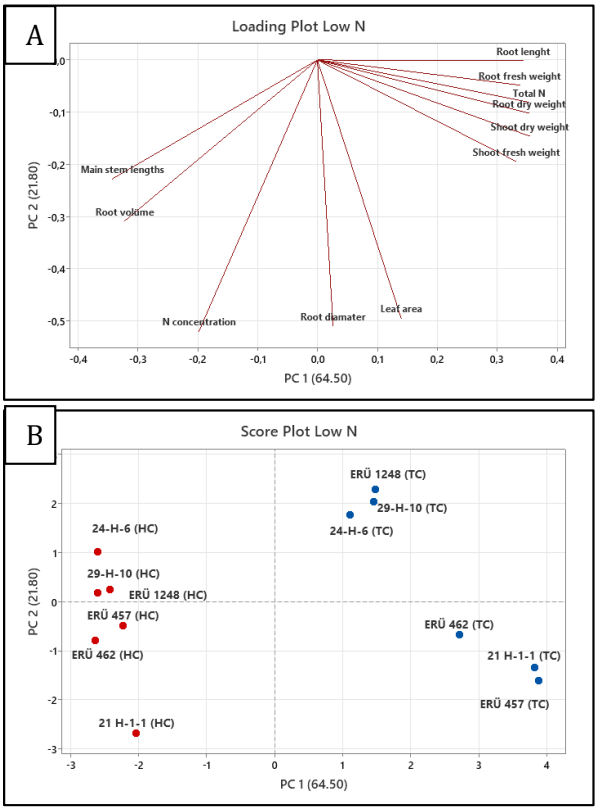


Figure 12. Principal Component Analysis (PCA) of pepper genotypes under low nitrogen conditions. (a) Loading plot showing the contribution of morphological and physiological traits to PC1 and PC2; (b) score plot showing the distribution of genotypes grown in tissue culture (TC) and hydroponic culture (HC) systems based on trait expression.

3.2. Evaluation of Genotypic Performance Consistency Across Growing Systems (Under High Nitrogen Conditions)

Under high nitrogen conditions, the evaluation of all measured traits—including main stem length, shoot/root fresh and dry weight, root length, leaf area, root volume,

nitrogen concentration, and total nitrogen—revealed a more differentiated performance among genotypes across tissue culture and hydroponic systems. While some genotypes showed similar rankings in both environments, others responded differently depending on the cultivation system. This indicates that under high nitrogen availability, system-specific factors may have a greater influence on genotype performance. Notably, 21 H-1-1, ERÜ 462, and ERÜ 457 demonstrated strong and consistent performance across multiple traits in the tissue culture system, ranking among the top-performing genotypes under high nitrogen conditions. In contrast, the same genotypes grown in hydroponic culture exhibited relatively lower performance for similar traits, indicating divergence in genotypic expression between the two systems. These findings suggest that genotype performance under high nitrogen supply may be more strongly influenced by the growing system. Therefore, when selecting genotypes for production environments with high nitrogen availability, system-specific responses should be considered. Nevertheless, genotypes such as 21 H-1-1 and ERÜ 462, which performed well under tissue culture conditions, may still be regarded as promising candidates in breeding programs aiming to improve nitrogen use efficiency (Figure 13).

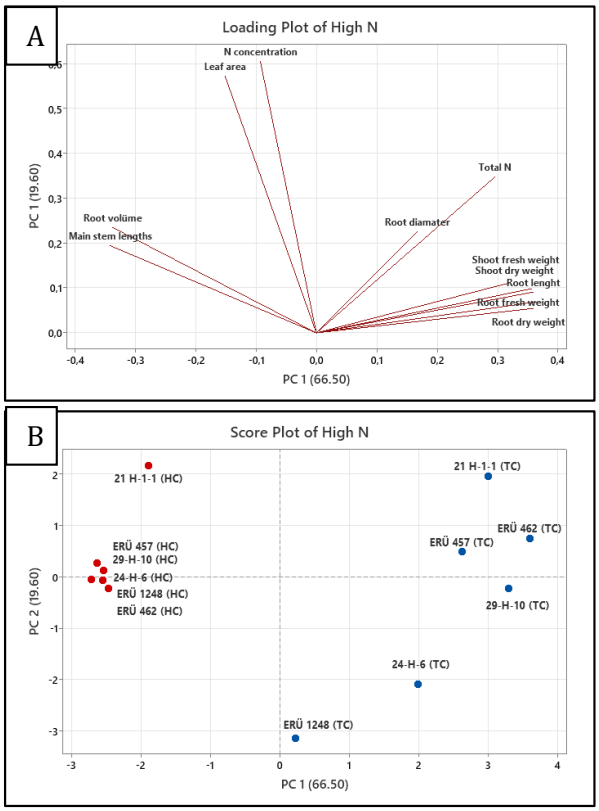


Figure 13. Principal Component Analysis (PCA) of pepper genotypes under high nitrogen conditions. (a) Loading plot showing the contribution of morphological and physiological traits to PC1 and PC2; (b) score plot showing the distribution of genotypes grown in tissue culture (TC) and hydroponic culture (HC) systems based on trait expression.

4. Discussion

Nitrogen is a key macronutrient influencing plant growth and development, especially under controlled cultivation systems. The results of this study demonstrated that nitrogen availability and the type of cultivation system (tissue culture vs. hydroponic culture) significantly affected the morphological and physiological traits of pepper genotypes. Under low nitrogen conditions, genotypes exhibited relatively stable and environment-independent performance, showing similar rankings in both systems. This suggests that low nitrogen environments, particularly in combination with tissue culture, may offer a cost-effective and reliable platform for early-stage genotype screening, especially in breeding programs with limited resources.

In contrast, under high nitrogen conditions, genotypic responses were more divergent between tissue culture and hydroponic systems, indicating that system-specific physiological factors such as nutrient uptake dynamics and root architecture may influence phenotypic expression. PCA analysis further supported these findings by clearly separating genotypes and traits based on nitrogen levels and cultivation systems. Traits related to biomass production such as shoot dry weight, root dry weight, and total nitrogen content were the primary contributors to variation, particularly in tissue culture under high nitrogen. Genotypes such as 21 H-1-1, ERÜ 462, and ERÜ 457 consistently performed well across environments and traits, highlighting their potential as stable and nitrogen-efficient candidates in breeding programs. These findings align with previous studies reporting that nitrogen positively influences biomass accumulation and vegetative growth (Ulas et al. 2019, 2021a, 2022; Jay et al. 2017; Zhang et al. 2020a, 2020b). Moreover, morphological root traits and physiological parameters such as root length, root diameter, and leaf chlorophyll content have been shown to play key roles in nitrogen uptake efficiency under stress conditions (Graciano et al. 2009). Our results also suggest that root diameter is a less nitrogen-sensitive trait compared to others and may be more influenced by the cultivation system, as supported by Barber and Silberbush (2015) and Föhse et al. (1988).

In addition to nitrogen stress, salt stress is another major limiting factor in crop productivity, particularly for sensitive crops like pepper. Therefore, there is an increasing need for practical and low-cost in vitro methods to identify salt-tolerant genotypes in a short time. Recent studies have shown that in vitro salt screening is a simple and inexpensive method that can be used to obtain reliable results rapidly (Pınar et al., 2024). For instance, the addition of ascorbic acid (AA) to in vitro cultures has been found to enhance salt tolerance by promoting callus growth under saline conditions, as observed in alfalfa (*Medicago sativa* L.) (Arab et al., 2006). Taken together, these results emphasize the importance of considering both abiotic stress factors and cultivation systems in plant breeding strategies. Tissue culture

systems, when used under controlled low-input stress conditions such as limited nitrogen or salt, can serve as a powerful selection platform for identifying genotypes with improved nutrient use efficiency and stress tolerance.

5. Conclusion

This study demonstrated that pepper genotypes responded differently to nitrogen availability and cultivation systems across a range of morphological and physiological traits. Under low nitrogen conditions, genotypes generally showed stable performance across both tissue culture and hydroponic systems, indicating environment-independent responses. In particular, 21 H-1-1, ERÜ 462, and ERÜ 457 consistently exhibited high performance, while genotypes such as 24-H-6 and ERÜ 1248 performed poorly under both conditions. These results suggest that selection under low nitrogen stress can effectively identify genotypes with stable and efficient nitrogen use across systems. In contrast, under high nitrogen conditions, genotypic performance was more influenced by the cultivation system. Tissue culture-grown plants generally showed greater biomass accumulation and nitrogen uptake compared to hydroponically grown plants. This highlights the importance of considering system-specific responses when selecting genotypes for environments with abundant nitrogen. Overall, 21 H-1-1 and ERÜ 462 were identified as promising candidates for future breeding efforts aimed at improving nitrogen use efficiency. Moreover, if cost-effective selection is a priority, early-stage screening under low nitrogen using tissue culture may provide a practical and reliable approach.

Author Contributions

The percentages of the authors' contributions are presented below. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

	A.A.	H.P.	F.U.	H.Y.	M.S	H.A.
C	20	20	15	15	15	15
D	20	20	15	15	15	15
S	20	20	15	15	15	15
DCP	20	20	15	15	15	15
DAI	20	20	15	15	15	15
L	20	20	15	15	15	15
W	20	20	15	15	15	15
CR	20	20	15	15	15	15
SR	20	20	15	15	15	15
PM	20	20	15	15	15	15
FA	20	20	15	15	15	15

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans.

References

Arab L, Ehsanpour AA. 2006. The effects of ascorbic acid on salt-induced alfalfa (Medicago sativa L.) in in vitro culture. Biokemistri, 18(2).

Barber SA, Silberbush M. 2015. Plant root morphology and nutrient uptake. In: Roots, Nutrient and Water Influx, and Plant Growth, London, UK, pp: 65-87.

Bolat İ, Kara Ö. 2017. Bitki besin elementleri: Kaynakları, işlevleri, eksik ve fazlalıkları. Bartın Orman Fak Derg, 19: 218-228.

Daneshmand F, Arvin MJ, Kalantari KM. 2010. Physiological responses to NaCl stress in three wild species of potato in vitro. Acta Physiol Plant, 32: 91-101.

Fageria NK, Baligar VC. 2003. Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency. J Plant Nutr, 26: 1315-1333.

Föhse D, Claassen N, Jungk A. 1988. Phosphorus efficiency of plants - I. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. Plant Soil, 110: 101-109.

Graciano C, Tambussi EA, Castán E, Guiamet JJ. 2009. Dry mass partitioning and nitrogen uptake by Eucalyptus grandis plants in response to localized or mixed application of phosphorus. Plant Soil, 319: 175-184.

Hirel B, Le Gouis J, Ney B, Gallais A. 2007. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. J Exp Bot, 58: 2369-2387.

Hoagland DR, Arnon DI. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. Circ Calif Agric Exp Stn, 1950: 347.

Homayoun H, Mehrabi P, Daliri MS. 2011. Study of salinity stress effect on two potato (Solanum tuberosum L.) cultivars in vitro. J Agric Environ Sci, 11: 729-732.

Jay S, Maupas F, Bendoula R, Gorretta N. 2017. Retrieving LAI, chlorophyll and nitrogen contents in sugar beet crops from multi-angular optical remote sensing: Comparison of vegetation indices and PROSAIL inversion for field phenotyping. Field Crops Res, 210: 33-46.

Kirkby EA. 2023. Introduction, definition, and classification of nutrients. In: Marschner's Mineral Nutrition of Plants, pp: 3-9.

Kjeldahl J. 1883. Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern. Z Anal Chem, 22: 366-382.

Loudari A, Benadis C, Naciri R, Soulaimania A, Zerouala Y, El Gharous M, Kalaji HM, Oukarroum A. 2020. Salt stress affects mineral nutrition in shoots and roots and chlorophyll a fluorescence of tomato plants grown in hydroponic culture. J Plant Interact, 15: 398-405.

Machado TA, Fernandes MS. 2001. Participatory maize breeding for low nitrogen tolerance. Euphytica, 122: 567-573.

Madeira AC, De Varennes A. 2005. Use of chlorophyll meter to assess the effect of nitrogen on sweet pepper development and growth. J Plant Nutr, 28: 1133-1144.

Matsuhisma M, Nagano H, Inubushi K. 2009. Global nitrogen cycling and its availability from soils. In: Nitrogen Assimilation in Plants, London, UK, pp: 19-32.

Moll RH, Kamprath EJ, Jackson WA. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of

nitrogen utilization. Agron J, 74: 562-564.

Murshed R, Najla S, Albiski F, Kassem I, Jbour M, Al-Said H. 2018. Using growth parameters for in vitro screening of potato varieties tolerant to salt stress. J Agri Sci Technol, 17 (2): 483-494

Nawaz MA, Wang L, Jiao Y, Chen C, Zhao L, Mei M, Yu Y, Bie Z, Huang Y. 2018. Pumpkin rootstock improves nitrogen use efficiency of watermelon scion by enhancing nutrient uptake, cytokinin content, and expression of nitrate reductase genes. Plant Growth Regul, 82: 233-246.

Pinar H, Yetişir H, Aydin A, Yigit MA, Ulaş A, Aydin H. 2024. Determination of in vitro salt testing efficiency and salinity tolerance of different pepper (Capsicum annuum L.) genotypes. Genetika, 56(2): 305-319.

Prado De Mello R. 2021. Mineral nutrition of tropical plants. Elsevier Academic Press, Burlington, MA, USA, pp: 339.

Ruiz JM, Rivero RM, Cervilla LM, Castellano R, Romero L. 2006. Grafting to improve nitrogen-use efficiency traits in tobacco plants. J Sci Food Agric, 86(6): 1014-1021.

Schulte Auf'm Erley G, Wijaya KA, Ulas A, Becker H, Wiesler F, Horst WJ. 2007. Leaf senescence and N uptake parameters as selection traits for nitrogen efficiency of oilseed rape cultivars. Physiol Plant, 130(4): 519-531.

Soleimani A, Talaei AR, Naghavi MR, Zamani Z. 2010. Male gametophytic and sporophytic screening of olive cultivars for salt stress tolerance. J Agric Sci Technol, 12: 173-180.

Tumbare AD, Nikam D, 2004. Effect of planting and fertigation on growth and yield of green chilli (Capsicum annuum). Indian J Agric Sci, 75(5): 242-245.

Ulas A, Doganci E, Ulas F, Yetisir H. 2019. Root-growth characteristics contributing to genotypic variation in nitrogen efficiency of bottle gourd and rootstock potential for watermelon. Plants Basel, 8(3): 77.

Ulas A, Yetisir H, Ulas F. 2022. Genotypic variation in nitrogen utilization efficiency of pepper (Capsicum annuum L.) under different nitrogen supply in hydroponic conditions. Gesunde Pflanzen, 74: 629-638.

Ulas F, Erdogdu S, Yetisir H, Ulas A. 2021b. Investigation on morphology and physiology of nitrogen efficiency in different pepper (Capsicum annuum L.) inbred lines. Genetika, 53(3): 1253-1272.

Ulas F, Yetisir H, Ulas A. 2021a. Root-growth characteristics contributing to nitrogen efficiency of reciprocally grafted potatoes (Solanum tuberosum L.) under hydroponic conditions. Gesunde Pflanzen, 73: 417-425.

Zhang J, Tong T, Potcho PM, Huang S, Ma L, Tang X. 2020a. Nitrogen effects on yield, quality and physiological characteristics of giant rice. Agronomy, 10(11): 1816.

Zhang Q, Song Y, Wu Z, Yan X, Gunina A, Kuzyakov Y, Xiong Z. 2020b. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation. J Clean Prod, 242: 118435.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1618267

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 875-884/ May 2025

PERFORMANCE EVALUATION OF SUPERVISED MACHINE LEARNING CLASSIFIERS FOR TYPE 2 DIABETES MELLITUS PREDICTION

Onur KURT[1]*

[1]*Istanbul Technical University, Faculty of Electrical and Electronics, Department of Electronics and Communication Engineering, 34469, Istanbul, Türkiye*

Abstract: Diabetes mellitus is a significant global health concern that profoundly affects individuals' lives and imposes a considerable burden on healthcare systems. Enhanced predictive capabilities can lead to timely interventions, ultimately improving patient outcomes and alleviating the strain on healthcare resources. Thus, accurate and timely prediction of diabetes mellitus is crucial for reducing mortality rates and minimizing complications within healthcare frameworks. This study addresses the correlation between type 2 diabetes mellitus (T2DM) and key attributes that differentiate diabetic from non-diabetic cases, utilizing various machine learning-based classification methods. For this reason, this work employed a large, open-source dataset obtained from Kaggle. To my knowledge, this is the first study utilizing such a dataset that specifically focuses on predicting T2DM in patients aged 35 years or older, according to the American Diabetes Association (ADA). To identify key features associated with T2DM for use as input to each supervised classifier, the Minimum Redundancy Maximum Relevance (mRMR) feature selection algorithm was applied to the dataset. In this analysis, the performance of each supervised classifier with feature selection was evaluated and compared using various metrics, including accuracy, sensitivity, specificity, precision (positive predictive value, PPV), negative predictive value (NPV), F1 score, and the area under the receiver operating characteristic curve (AUROC). The results of the analysis reveal that an ensemble method employing boosted trees (EBT) classifier surpasses the other models, recording the highest macro-average values for accuracy (95.9%), PPV (97.7%), NPV (97.7%), and F1 score (89.7%), along with the superior area under the curve (AUC) of 95.57% for both diabetes and non-diabetes cases. The study suggests that machine learning classifiers can serve as a reliable tool for the precise prediction of T2DM, thereby enhancing clinical decision-making processes for healthcare practitioners.

Keywords: Classification, Feature selection, Supervised learning, Type 2 diabetes mellitus

***Corresponding author:** Istanbul Technical University, Faculty of Electrical and Electronics, Department of Electronics and Communication Engineering, 34469, Istanbul, Türkiye
E mail: onurkurt@itu.edu.tr (O. KURT)
Onur KURT https://orcid.org/0000-0002-4486-2257

Received: January 12, 2025
Accepted: April 22, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Kurt O. 2025. Performance evaluation of supervised machine learning classifiers for type 2 diabetes mellitus prediction. BSJ Eng Sci, 8(3): 875-884.

1. Introduction

Diabetes mellitus is a major health challenge that significantly affects individuals on a global scale (Lin et al., 2020). Diabetes mellitus is a chronic condition marked by elevated blood glucose levels, referred to as hyperglycemia. It occurs when the body either produces insufficient insulin, a hormone secreted by the pancreas, or is unable to utilize the insulin effectively (WHO, 2024). Over time, diabetes significantly increases the risk of damage to the eyes, kidneys, nerves, and heart, potentially leading to severe complications such as blindness, heart disease, stroke, and kidney failure (Zhou et al., 2023). The International Diabetes Federation (IDF) reports that approximately 537 million individuals globally are affected by diabetes mellitus in 2021, with projections indicating an increase to 643 million by 2030 and 783 million by 2045 (IDF, 2021). Diabetes mellitus can be broadly classified into three types: Type 1 diabetes mellitus (T1DM), Type 2 diabetes mellitus (T2DM), and gestational diabetes mellitus (GDM) (Rastogi and Bansal, 2023). T1DM, a complex autoimmune disorder characterized by the destruction of insulin-producing pancreatic β cells, is most commonly diagnosed in children (Cano-Cano et al., 2022; Costa-Cordella et al., 2021). In contrast, T2DM, also known as insulin-independent diabetes, arises due to insulin resistance or insufficient insulin production and is predominantly diagnosed in middle-aged and older adults (Ma et al., 2022; Varma et al., 2014; Carrillo-Larco et al., 2024). GDM, the third major form of diabetes, typically develops during pregnancy (Fazakis et al., 2021). Although each type of diabetes impacts individual health and places a significant burden on healthcare systems worldwide, over 90% of all diabetes cases are attributed to T2DM, making it the most prevalent form of the disease globally (Borse et al., 2021; Laakso and Kuusisto, 2014). According to the World Health Organization (WHO), the global prevalence of diabetes is projected to rise substantially, leading to an increase in mortality rates worldwide (WHO, 2024). Thus, early detection and effective management of diabetes are

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

essential not only for improving individual health outcomes but also for mitigating complications and reducing the burden on healthcare systems. Recently, machine learning (ML) algorithms have gained significant popularity, particularly in engineering and science, and are now employed in a wide range of applications, including medical diagnostics, computer vision, predictive analytics in environmental science, and image recognition, among others. ML is a subset of artificial intelligence (AI) that facilitates the training of computers to make precise predictions based on provided input data (Janiesch et al., 2021; Jordan and Mitchell, 2015; Kurt, 2024). In recent years, significant efforts have focused on ML techniques to predict diabetes mellitus, offering advantages over conventional diagnostic methods. Rastogi and Bansal (2023) proposed data mining techniques to predict diabetes based on dataset collected from Kaggle. The authors employed four data mining techniques, namely Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), Logistic Regression (LR), and Naive Bayes (NB), and compared their performance using accuracy and sensitivity. Their findings showed that the highest accuracy of 82.46% was achieved with LR compared to the other models. Febrian et al. (2023) conducted a study to predict diabetes using two ML models, namely k-nearest neighbors (KNN) and NB, based on the Pima Indians Diabetes dataset obtained from Kaggle. Their study indicated that NB outperforms KNN, with an average accuracy of 76.07%, an average precision of 73.37%, and an average recall of 71.37%. Tasin et al. (2022) conducted a comparative analysis of various ML models for predicting diabetes, using the open-source Pima Indians dataset and a private dataset of female Bangladeshi patients. In their study, they also utilized SMOTE and ADASYN preprocessing techniques to handle the issue of imbalanced class problems. Their results demonstrated that the Extreme Gradient Boosting (XGBoost) classifier achieved the best performance with 81% accuracy and an F1 score and the area under the curve (AUC) of 0.81 and 0.84, respectively, with the ADASYN approach. Additionally, Tigga and Garg (2020) implemented six ML models and compared their results to obtain a suitable model for predicting T2DM using a dataset collected through both online and offline questionnaires. The same algorithms were also applied to the Pima Indian Diabetes dataset. Their experimental results indicated that the accuracy of the RF model is 94.10%, the highest among the other models. Similarly, Talukder et al. (2024) utilized several datasets obtained from publicly available sources. They utilized a range of ML models to predict diabetes mellitus using four different datasets. The performance analysis revealed that, among all ML algorithms, RF outperforms existing methods with accuracy rates of 86% and 98.48% for Dataset 1 and Dataset 2, respectively, while XGBoost and Decision Tree (DT) algorithms achieve accuracy rates of 99.27% and 100% for Dataset 3 and Dataset 4, respectively. In addition, Modak and Jha (2024) estimated diabetes using the Diabetic2 dataset collected from Kaggle by employing various ML models. They demonstrated that CatBoost stands out as the most effective model, achieving an impressive accuracy rate of 95.4%, surpassing XGBoost's accuracy of 94.3%. Futhermore, CatBoost's superior AUC-ROC score of 0.99 further underscores its potential advantage over XGBoost, which attained an AUC-ROC score of 0.98. Bhat et al. (2023) developed three ML-based classification algorithms: LR, Gradient Boosting (GB), and DT, combined with a feature selection method, to forecast different types of diabetes using the Pima Indian Diabetes Dataset. They obtained the highest accuracy rate (91 %), precision (96 %), recall (92 %), and F1 score (94 %) using DT. Similarly, Zhou et al. (2023) conducted a study to predict diabetes utilizing Boruta feature selection and ensemble learning with the Pima Indian Diabetes Dataset. The obtained results showed that the model achieves an accuracy rate of 98% and demonstrates strong performance. While these studies offer significant contributions to the prediction of diabetes mellitus, they mainly focused on the Pima Indians dataset, either in isolation or in combination with other datasets. Therefore, the desire to enhance the accuracy of ML-based predictions of diabetes necessitates a detailed study based on a different dataset. This paper reports a comprehensive study on classification-based prediction of diabetes mellitus using various ML models applied to a multi-feature diabetes prediction dataset obtained from Kaggle. To attain this target, the study utilizes a range of ML models, including linear discriminant analysis (LDA), LR, Gaussian NB, fine Gaussian SVM, Fine KNN, and an ensemble method employing boosted trees (EBT). The choice of these models for diabetes prediction was guided by their strengths and appropriateness for the task. Furthermore, Minimum Redundancy Maximum Relevance (mRMR) feature selection method was utilized to identify key determinants associated with diabetes mellitus by analyzing medical history and demographic information. The results of the study reveal that EBT classifier stands out as the most reliable model among the other models for predicting diabetes based on the performance evaluation criteria. The findings suggest that the proposed models enhance the understanding of diabetes classification within the scientific community and may assist medical professionals in diabetes treatment and decision-making processes. To the best of my knowledge, this is the first study to conduct a detailed analysis using this specific dataset to predict T2DM in patients aged 35 years or older, as defined by the American Diabetes Association (ADA, 2021). This dataset, which has not been previously explored in the context of T2DM prediction for this age group, offers unique demographic, clinical, and possibly lifestyle-related variables that distinguish it from commonly used datasets in diabetes research. Unlike prior studies that rely on more generalized or widely available datasets, this research leverages a novel data source that enables a more precise and tailored predictive modeling approach. By doing so, it contributes to the existing

literature by filling a critical gap in age-specific diabetes risk assessment, potentially leading to improved early detection and personalized intervention strategies. The structure of this paper is as follows: The introduction outlines the objectives of the study and includes a review of relevant literature. Section 2 presents an overview of the methods employed for preparing the dataset for ML models. Section 3 discusses the results of the analysis, which are further elaborated in Section 4 through a comprehensive discussion. Finally, the conclusion and potential future directions are outlined in Section 5.

2. Materials and Methods

2.1. Data Description

The present study utilized an open-source dataset, referred to as the "diabetes prediction dataset", which was collected from Kaggle (Kaggle, 2024). The dataset comprises 8 features that are associated with diabetes, which serves as the target variable for analysis. These features (gender, age, hypertension, heart disease, smoking history, body mass index, HbA1c level, blood glucose level) include various clinical and demographic attributes that may influence the prediction of diabetes outcomes. The target variable in this study is the diabetes status of patients, classified as either positive (indicating the presence of diabetes) or negative (indicating the absence of diabetes). This study employed binary classification, designating the outcome variable as '0' for non-diabetic patients and '1' for diabetic patients, with diabetes status serving as the primary outcome variable. Descriptions of all variables included in the analysis is presented in Table 1. Since T2DM accounts for over 90% of all diabetes cases (Borse et al., 2021; Laakso and Kuusisto, 2014), the primary focus of the current study is based on data related to T2DM. According to the American Diabetes Association (ADA), the recommended age of annual diabetes screening tests for T2DM has decreased to as young as 35 years (ADA, 2021). For this reason, this study only considers patients who are 35 years of age or older. The statistical values of all numerical features, as well as the distributions of all categorical and nominal features, including the target variable, are presented in Table 2 and Table 3, respectively.

Table 1. Descriptions of all variables including numerical, categorical, and nominal

Variable Name	Type	Description
Gender	Categorical	Gender of the individual (0 = Female, 1 = Male)
Age	Continuous	Age of the individual in years
Hypertension	Categorical	Presence of hypertension (0 = No, 1 = Yes)
Heart Disease	Categorical	Presence of heart disease (0 = No, 1 = Yes)
Smoking History Never	Nominal	Smoking history - Never smoked (0 = No, 1 = Yes)
Smoking History Former	Nominal	Smoking history - Former smoker (0 = No, 1 = Yes)
Smoking History Not Current	Nominal	Smoking history - Not current smoker (0 = No, 1 = Yes)
Smoking History Current	Nominal	Smoking history - Current smoker (0 = No, 1 = Yes)
Smoking History Ever	Nominal	Smoking history - Ever smoked (0 = No, 1 = Yes)
Smoking History No Info	Nominal	Smoking history - No information (0 = No, 1 = Yes)
BMI	Continuous	Body Mass Index
HbA1c Level	Continuous	Level of HbA1c - hemoglobin A1c test (a marker for diabetes management)
Blood Glucose Level	Continuous	Blood glucose level measured in mg/dL
Diabetes	Categorical	Presence of diabetes (0 = No, 1 = Yes)

Table 2. Summary statistics of all numerical features

Variable Name	Minimum	Maximum	Mean	Median	Mode	Standard Deviation
Age	35	80	56.873	56	80	13.547
BMI	10.01	91.82	29.025	27.32	27.32	6.042
HbA1c Level	3.5	9	5.598	5.8	5.7	1.114
Blood Glucose Level	80	300	140.966	145	130	43.671

Table 3. Distribution of all categorical and nominal features including target variable

Variable name	Count 0 (Non diabetes)	Count 1 (Diabetes)
Gender	36180	25053
Hypertension	54007	7226
Heart Disease	57315	3918
Smoking History Never	38532	22701
Smoking History Former	53034	8199
Smoking History Not Current	56685	4548
Smoking History Current	54875	6358
Smoking History Ever	58215	3018
Smoking History No Info	44824	16409
Diabetes	53172	8061

2.2. Data Preprocessing

Data preprocessing is a crucial step for preparing the dataset in an appropriate format prior to its use as input for ML classifiers. Data preprocessing was conducted using MATLAB R2022b. The flowchart illustrating the proposed methodology for diabetes mellitus prediction is presented in Figure 1. A subset of the dataset was generated by extracting specific data related to T2DM from the original dataset. As most ML algorithms are designed to work with numerical data, categorical data, such as gender, were converted into binary numerical format using label encoding, while smoking history was converted into binary numerical format using one-hot encoding. Since hypertension, heart disease, and diabetes are already labeled as binary numbers in the original dataset, no conversion was performed for those variables. In order to ensure that all features are on the same scale, continuous numerical features (age, body mass index, HbA1c level, blood glucose level) were normalized to a range between 0 and 1 using min-max scaling, as expressed by the following formula (equation 1):

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

where x_{norm} is the normalized value, x represents the original value in the dataset, and x_{min} and x_{max} represent the minimum and maximum values in the dataset, respectively.

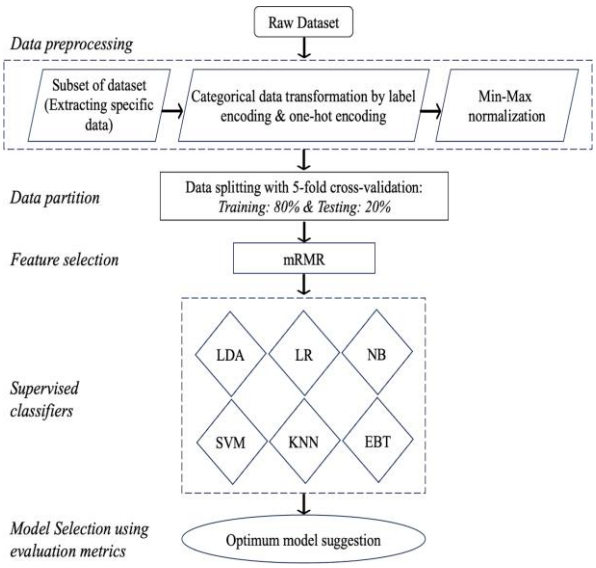


Figure 1. Flow chat of the proposed methodology for type 2 diabetes mellitus prediction.

To train and evaluate the performance of all ML models for diabetes prediction, the dataset was split into training and testing sets with an 80:20 ratio. To prevent the risk of overfitting, all ML classifiers were trained using 5-fold cross-validation, and their performance was evaluated on a separate test dataset. Additionally, a feature selection method was employed to identify key attributes most relevant to diabetes mellitus within the dataset. The mRMR feature selection method, which effectively handles both numerical and categorical variables, was selected to extract a subset of features from the dataset. The selection of the mRMR feature selection method for the dataset with mixed data types is justified by several key factors. Primarily, mRMR's ability to handle both continuous and categorical variables through mutual information computation makes it particularly suitable for such diverse dataset. The method's dual optimization approach, which maximizes feature relevance while minimizing redundancy, ensures a more informative and diverse feature subset, potentially enhancing model performance and interpretability. Additionally, mRMR's computational efficiency and scalability to larger datasets make it a practical choice for high-dimensional data analysis. Its model-agnostic nature allows for flexibility in subsequent modeling approaches, enabling experimentation with various algorithms. Furthermore, mRMR has demonstrated effectiveness across multiple domains, including bioinformatics, finance, and healthcare, lending empirical support to its reliability in selecting features that significantly contribute to predictive accuracy. In comparison to alternative methods such as filter methods (e.g., chi-square, ANOVA), wrapper methods (e.g., forward selection), and embedded methods (e.g., LASSO), mRMR offers a balanced approach that avoids the pitfalls of independent feature evaluation, computational expense, overfitting, and model-specificity. Given these considerations, mRMR presents the optimal balance of theoretical rigor and practical utility for this

study, aligning well with the characteristics of the dataset and the requirements of this analysis. The mRMR can be mathematically represented as (equation 2):

$$R(x_i, c) = I(x_i; c) \quad (2)$$

where R represents relevance, x_i is a feature, c is the target variable, and $I(x_i;c)$ denotes the mutual information between feature x_i and the target variable c (equation 3).

$$R(S) = \frac{1}{|S|^2} \sum_{x_i, x_j \in S} I(x_i; x_j) \quad (3)$$

where R represents redundancy among selected features, S is the set of selected features, and $I(x_i;x_j)$ is the mutual information between x_i and x_j.

By combining relevance and redundancy, the mRMR becomes as follows (equation4):

$$mRMR(x_i) = R(x_i, c) - R(S) \quad (4)$$

Figure 2 presents the normalized importance scores of individual features as determined by the mRMR feature selection method. In the feature selection process, a moderate threshold value of 0.12 was selected based on the distribution of normalized importance scores across all features, as shown in Figure 2. This threshold was determined through iterative testing across multiple supervised classifiers, where cross-validation experiments with varying threshold values indicated that 0.12 achieved an optimal balance between model complexity and predictive performance. This threshold retained the top five features while excluding those with minimal contribution to model accuracy. The five significant diabetes-related features identified through the mRMR method are blood glucose level, smoking history ever, hypertension, HbA1c level, and gender, as shown in Table 4.

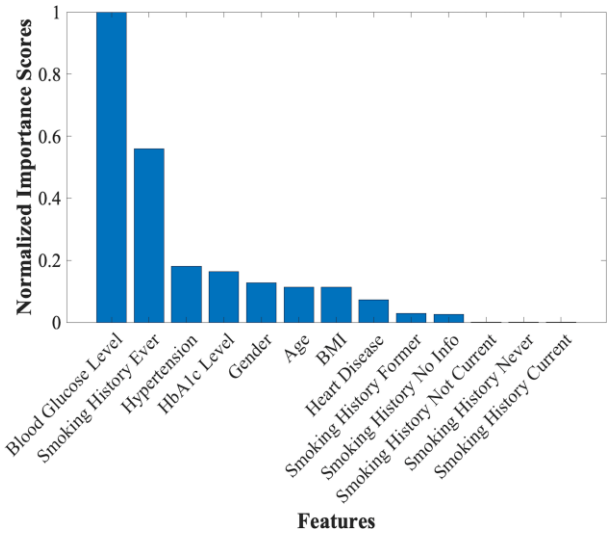


Figure 2. Normalized importance scores of individual features based on mRMR feature selection algorithm.

Table 4. Normalized importance scores of features based on mRMR feature selection algorithm.

Feature Name	Importance Scores
Blood Glucose Level	1
Smoking History Ever	0.559
Hypertension	0.180
HbA1c Level	0.163
Gender	0.127

2.3. Supervised Classifiers

The present study utilized a variety of ML-based classification models for the prediction of diabetes mellitus. The classifiers used in this study include the following: LDA, LR, Gaussian NB, Fine Gaussian SVM, Fine KNN, and EBT. A brief description of each model used for predicting diabetes mellitus is provided below.

2.3.1. Linear discriminant analysis

Linear Discriminant Analysis (LDA) is a method used for classification, which seeks to derive a linear combination of input features that effectively differentiate between distinct classes. It works by increasing the separation between the class means and reducing the within-class variance, resulting in a decision boundary that optimizes class distinction (Zhao et al., 2024).

2.3.2. Logistic regression

Logistic regression (LR) is a statistical technique employed for binary classification, which models the relationship between a dependent variable and one or more independent variables by estimating probabilities. It utilizes the logistic function to map linear combinations of the input features to values between 0 and 1, representing the likelihood of the target class. Due to its simplicity, interpretability, and effectiveness, logistic regression is widely applied in fields such as medical diagnosis and credit scoring (Anderson et al., 2003).

2.3.3. Naive Bayes

The Naive Bayes (NB) classifier is a basic probabilistic algorithm in machine learning based on Bayes' theorem. Its key feature is the assumption that the features are independent of each other when given the target class. By calculating posterior probabilities using prior class information and feature likelihoods, the algorithm efficiently classifies new instances. This approach allows it to perform well in various classification tasks, especially in high-dimensional situations where speed is important (Ren et al., 2009).

2.3.4. Support vector machine

The Support Vector Machine (SVM) methodology identifies optimal decision boundaries in multidimensional spaces by leveraging geometric principles to maximize class separation. The algorithm's fundamental idea is margin maximization, in which it finds

a hyperplane that keeps the greatest distance between the closest training data points of various classes. By projecting data into higher-dimensional spaces through kernel transformations, SVM goes beyond linear classification and makes it possible to solve intricate, non-linearly separable classification problems while preserving computational efficiency (Chandra and Bedi, 2018).

2.3.5. K-nearest neighbor

The k-nearest neighbor (KNN) classifier is a straightforward and effective supervised machine learning algorithm widely applied to classification tasks. It predicts the class of a data point by analyzing the majority class among its closest neighbors, identified using distance metrics such as Euclidean or Manhattan distance (Hidayati and Hermawan, 2021).

2.3.6. Ensemble classifier

ML models known as ensemble classifiers (EC) combine several separate models to improve classification performance and accuracy. Compared to utilizing a single model, combining the strengths of several models yields better outcomes, increased reliability, and improved generalization. Boosting, stacking, and bagging are common ensemble approaches that each have a distinct function in prediction (Mohapatra et al., 2023). The hyperparameters of each implemented algorithm are presented in Table 5.

Table 5. Description of hyperparameters used for the implemented machine learning models

Supervised Classifiers	Hyperparameters	Parameter Values/description
LDA (Linear Discriminant Analysis)	Discriminant Type	Linear
	Covariance Structure	Full
	Gamma	0 (No Regularization)
	Fill Coefficients	Off
LR (Logistic Regression)	Model Type	Logistic Regression
	Distribution	Binomial
	Link Function	Logit
	Loss Function	Logarithmic Loss
NB (Gaussian Naive Bayes)	Distribution Name for Numeric Predictors	Gaussian
	Distribution Name for Categorical Predictors	mvmn (Multinomial)
SVM (Fine Gaussian Support Vector Machine)	Kernel Function	Gaussian
	Box Constraint Level	1
	Kernel Scale	0.56
	Multiclass Method	One-vs-One
	Standardize Data	No
KNN (Fine K Nearest Neighbor)	Number of Neighbors (K)	1
	Distance Metric	Euclidean
	Distance Weight	Equal
	Standardize Data	No
EBT (Ensemble Boosted Trees)	Ensemble Method	AdaBoost
	Learner Type	Decision Tree
	Maximum Number of Splits	20
	Number of Trees (Learners)	30
	Learning Rate	0.1
	Number of Predictors to Sample	Select All

3. Results

In this section, the results obtained from various ML-based classifiers are presented in detail. The quantitative assessment of classification models is conducted through the systematic analysis of performance metrics computed from the confusion matrix. The performance of those models with feature selection is evaluated using the following metrics: accuracy, sensitivity (recall or true positive rate, TPR), specificity (selectivity or true negative rate, TNR), precision (positive predictive value, PPV), negative predictive value (NPV), F1 score, and the area under the receiver operating characteristic curve (AUROC). These evaluation metrics are computed by the following equations (5-10):

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (5)$$

$$Sensitivity(Recall) = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6)$$

$$Specificity(Selectivity) = \frac{TN}{TN + FP} \quad (7)$$

$$Precision(PPV) = \frac{TP}{TP + FP} \quad (8)$$

$$NPV = \frac{TN}{TN + FN} \quad (9)$$

$$F1\ Score = \frac{2 \times Recall \times Precision}{Recall + Precision} \quad (10)$$

Table 6, Table 7, and Table 8 present the confusion matrices, evaluation metrics, and macro-average metrics for each classifier, respectively. The receiver operating characteristic (ROC) curves for all classifiers are illustrated in Figure 3. The macro-average evaluation metrics of each classifier are visually presented in Figure 4, with colored bar graphs showing accuracy, sensitivity, specificity, PPV, NPV, and F1 score for T2DM prediction.

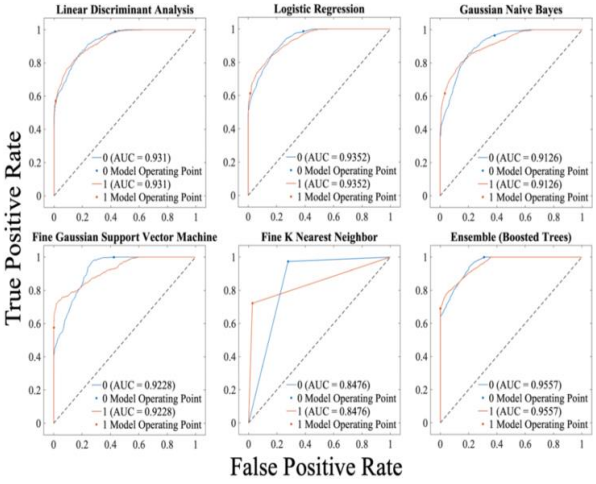


Figure 3. ROC curves for each supervised classifier with mRMR feature selection algorithm.

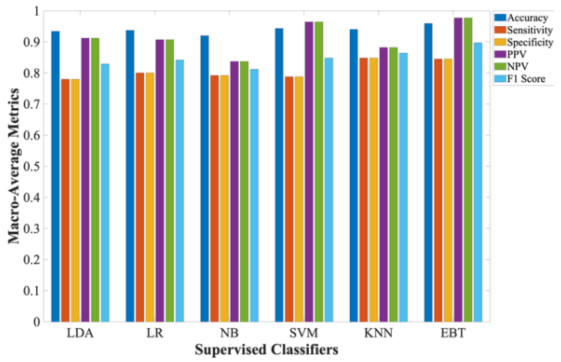


Figure 4. Macro-average evaluation metrics for each supervised classifier with mRMR feature selection algorithm

Table 6. Confusion matrices of each supervised classifier based on mRMR feature selection algorithm

Supervised Classifiers	Confusion Matrix		
	Classes	Non Diabetes	Diabetes
LDA (Linear Discriminant Analysis)	Non Diabetes	10516	118
	Diabetes	692	920
LR (Logistic Regression)	Non Diabetes	10487	147
	Diabetes	624	988
NB (Gaussian Naive Bayes)	Non Diabetes	10269	365
	Diabetes	618	994
SVM (Fine Gaussian Support Vector Machine)	Non Diabetes	10623	11
	Diabetes	683	929
KNN (Fine K Nearest Neighbor)	Non Diabetes	10354	280
	Diabetes	449	1163
EBT (Ensemble Boosted Tree)	Non Diabetes	10633	1
	Diabetes	499	1113

Table 7. Evaluation metrics of each supervised classifier based on mRMR feature selection algorithm

Supervised Classifiers	Evaluation Metrics for Each Class						
	Types	Accuracy	Sensitivity	Specificity	PPV	NPV	F1 Score
LDA (Linear Discriminant Analysis)	Non Diabetes	0.934	0.989	0.571	0.938	0.886	0.963
	Diabetes	0.934	0.571	0.989	0.886	0.938	0.694
LR (Logistic Regression)	Non Diabetes	0.937	0.986	0.613	0.944	0.870	0.965
	Diabetes	0.937	0.613	0.986	0.870	0.944	0.719
NB (Gaussian Naive Bayes)	Non Diabetes	0.920	0.966	0.617	0.943	0.731	0.954
	Diabetes	0.920	0.617	0.966	0.731	0.943	0.669
SVM (Fine Gaussian Support Vector Machine)	Non Diabetes	0.943	0.999	0.576	0.940	0.988	0.968
	Diabetes	0.943	0.576	0.999	0.988	0.940	0.728
KNN (Fine K Nearest Neighbor)	Non Diabetes	0.940	0.974	0.721	0.958	0.806	0.966
	Diabetes	0.940	0.721	0.974	0.806	0.958	0.761
EBT (Ensemble Boosted Tree)	Non Diabetes	0.959	1	0.690	0.955	0.999	0.977
	Diabetes	0.959	0.690	1	0.999	0.955	0.817

Table 8. Macro-average evaluation metrics for each supervised classifier with mRMR feature selection algorithm (The best outcomes are highlighted in bold)

Supervised Classifiers	Macro-Average Metrics					
	Accuracy	Sensitivity	Specificity	PPV	NPV	F1 Score
LDA (Linear Discriminant Analysis)	0.934	0.780	0.780	0.912	0.912	0.829
LR (Logistic Regression)	0.937	0.800	0.800	0.907	0.907	0.842
NB (Gaussian Naive Bayes)	0.920	0.792	0.792	0.837	0.837	0.812
SVM (Fine Gaussian Support Vector Machine)	0.943	0.788	0.788	0.964	0.964	0.848
KNN (Fine K Nearest Neighbor)	0.940	0.848	0.848	0.882	0.882	0.864
EBT (Ensemble Boosted Tree)	**0.959**	**0.845**	**0.845**	**0.977**	**0.977**	**0.897**

4. Discussion

Feature selection, while minimally impacting overall performance metrics compared to the case without feature selection (see supplementary material), plays a vital role in machine learning, especially in medical applications. It enhances model interpretability by reducing predictors, allowing healthcare professionals to better understand and trust models based on a smaller, more meaningful feature subset. This approach also improves computational efficiency, enabling faster, more scalable models for real-time decision-making. Moreover, feature selection can lead to cost savings in data gathering and processing for real-world applications. Given these benefits, this section primarily focuses on a comparative analysis of supervised classifiers with feature selection to identify the most suitable model for predicting diabetes mellitus. All models exhibited high predictive performance, with macro-average accuracy ranging from 92% to 95.9% and AUC values ranging from 84.76% to 95.57%. According to the confusion matrices in Table 5, the EBT classifier demonstrates superior performance, achieving the highest number of true negatives and the lowest number of false positives. This indicates its exceptional effectiveness in accurately identifying non-diabetic individuals while minimizing misclassification as diabetic. Although EBT exhibits a slightly higher number of false negatives compared to KNN, its overall balance between true negatives and false positives establishes it as a highly reliable model. It minimizes classification errors while maintaining a robust ability to identify diabetic cases. In contrast, KNN achieves the highest number of true positives but is limited by a substantial number of false positives, reducing its effectiveness in correctly identifying non-diabetic individuals. In addition, the results of the study reveal that the EBT classifier outperforms the other models, achieving the best

accuracy of 95.9% for both non-diabetes and diabetes, an F1 score of 97.7% for non-diabetes and 81.7% for diabetes, and an AUC of 95.75% for both conditions (Table 6). Moreover, the best macro-average accuracy (95.9%), PPV (97.7%), NPV (97.7%), and F1 score (0.897) were achieved with the EBT classifier, indicating superior predictive performance compared to the other classifiers (Table 7). Additionally, the highest macro-average sensitivity and specificity were obtained, with 84.5% for the EBT classifier and 84.8% for the fine KNN classifier. The predictions produced by the ML models in this study exhibit a satisfactory level of accuracy in comparison to the results from prior research. For instance, Rastogi and Bansal (2023) utilized several data mining techniques for the prediction of diabetes based on an open-source dataset. In their study, they obtained the best accuracy of 82.46% using LR and the sensitivity of 68.88% using RF. These values are lower than those presented in Table 6 in this study. In addition, Tasin et al. (2022) performed a comparative analysis of various ML models for predicting diabetes using an open-source dataset. In their study, they employed SMOTE and ADASYN preprocessing techniques to address the problem of class imbalance. Their findings indicated that the XGBoost classifier achieved an accuracy of 81% and F1 score and AUC values of 0.81 and 0.84, respectively, which represent the best outcomes in their study but are lower than the values obtained in this study. Similarly, Tigga and Garg (2020) compared to performance of a variety of ML models for the prediction of T2DM. According to their experimental findings, the RF model has the highest accuracy of all the models, at 94.10%. Their result is also lower than the results obtained in this study. Unlike these studies, which employed resampling techniques to balance class distribution, this approach preserved the natural class imbalance to ensure real-world applicability. The observed imbalance reflects the actual prevalence of Type 2 Diabetes Mellitus (T2DM) in the population being studied, and by maintaining this distribution, the model's performance metrics more accurately represent what would be expected in real-world clinical applications. Modifying the class proportions could introduce bias and reduce the generalizability of the model to clinical practice. Furthermore, a key objective of this research was to evaluate the inherent robustness of various supervised classifiers when faced with naturally occurring class imbalance. To mitigate potential biases introduced by the imbalance, we focused on performance metrics that are less sensitive to skewed class distributions, such as the F1-score, AUC-ROC, precision, and recall. Despite the class imbalance, our evaluation metrics—including accuracy, sensitivity, specificity, positive predictive value (PPV), negative predictive value (NPV), and F1-score—indicated that the models performed reliably across different classifiers. The results of the analysis indicate that ML-based classifiers, particularly the EBT classifier, possess enhanced predictive capabilities for estimating T2DM. The study suggests that ML-based classifiers offer a reliable approach for accurately predicting T2DM and supporting medical professionals in clinical decision-making.

5. Conclusion

This study provides a comprehensive analysis of diabetes mellitus detection, particularly T2DM, based on a large, open-source dataset obtained from Kaggle. To my knowledge, this is the first study conducted using this dataset, specifically focusing on patients aged 35 years or older for T2DM prediction. The dataset was preprocessed as an initial step to prepare it in a suitable format for ML models. In addition, a feature selection method was applied to the preprocessed dataset to identify key attributes, which were used as input for the ML models. The mRMR feature selection method was chosen due to its advantages, including balancing relevance and redundancy, applicability to different data types, robustness against overfitting, and ability to handle high-dimensional datasets. Five significant features, namely blood glucose level, smoking history ever, hypertension, HbA1c level, and gender were selected using the mRMR feature selection method. Various supervised classifiers were employed to distinguish diabetes mellitus from non-diabetes mellitus. The performance of these models was assessed using multiple evaluation metrics, including accuracy, sensitivity, specificity, PPV, NPV, F1 score, and AUROC. The findings reveal that the EBT classifier surpasses the other models, recording the highest macro-average values for accuracy (95.9%), PPV (97.7%), NPV (97.7%), and F1 score (0.897), along with the superior AUC of 95.57% for both diabetes and non-diabetes cases. Although the outcomes of the ML classifiers employed in this study provide optimal results, there remains potential for improvement in sensitivity, specificity, and F1 score. This can be achieved by further optimizing the ML models. Additionally, a more comprehensive dataset may be utilized to increase the predictive power of the models. Furthermore, future research will also include the development of hybrid ML model(s) to enhance predictive performance by integrating the strengths of various algorithms, thereby improving accuracy and robustness in predicting outcomes related to diabetes mellitus.

Author Contributions

The percentages of the author' contributions are presented below. The author reviewed and approved the final version of the manuscript.

	O.K.
C	100
D	100
S	100
DCP	100
DAI	100
L	100
W	100
CR	100
SR	100
PM	100
FA	100

C=Concept, D= design, S= supervision, DCP= data collection and/or processing, DAI= data analysis and/or interpretation, L= literature search, W= writing, CR= critical review, SR= submission and revision, PM= project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The author declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans. The study employed an open-source dataset.

References

American Diabetes Association. 2021. URL: https://diabetes.org/newsroom/latest-ada-annual-standards-of-care-includes-changes-to-diabetes-screening-first-line-therapy-pregnancy-technology (accessed date: January 6, 2025)

Anderson RP, Jin R, Grunkemeier GL. 2003. Understanding logistic regression analysis in clinical reports: an introduction. Ann Thorac Surg, 75(3): 753–757.

Bhat SS, Banu M, Ansari GA, Selvam V. 2023. A risk assessment and prediction framework for diabetes mellitus using machine learning algorithms. Healthc Anal, 4: 100273.

Borse SP, Chhipa AS, Sharma V, Singh DP, Nivsarkar M 2021. Management of type 2 diabetes: current strategies, unfocussed aspects, challenges, and alternatives. Med Princ Pract, 30(2): 109–121.

Cano-Cano F, Gómez-Jaramillo L, Ramos-García P, Arroba AI, Aguilar-Diosdado M. 2022. IL-1β implications in type 1 diabetes mellitus progression: systematic review and meta-analysis. J Clin Med, 11(5): 1303.

Carrillo-Larco RM, Guzman-Vilca WC, Xu X, Bernabe-Ortiz A. 2024. Mean age and body mass index at type 2 diabetes diagnosis: pooled analysis of 56 health surveys across income groups and world regions. Diabet Med, 41(2): e15174.

Chandra MA, Bedi SS. 2018. Survey on SVM and their application in image classification. Int J Inf Technol, 13(5): 1–11.

Costa-Cordella S, Luyten P, Cohen D, Mena F, Fonagy P. 2021. Mentalizing in mothers and children with type 1 diabetes. Dev Psychopathol, 33(1): 216–225.

Fazakis N, Kocsis O, Dritsas E, Alexiou S, Fakotakis N, Moustakas K. 2021. Machine learning tools for long-term type 2 diabetes risk prediction. IEEE Access, 9: 103737–103757.

Febrian ME, Ferdinan FX, Sendani GP, Suryanigrum KM, Yunanda R. 2023. Diabetes prediction using supervised machine learning. Procedia Comput Sci, 216: 21–30.

Hidayati N, Hermawan A. 2021. K-Nearest Neighbor (K-NN) algorithm with Euclidean and Manhattan in classification of student graduation. J Eng Appl Sci Technol, 2(2): 86–91.

International Diabetes Federation. 2021. URL: https://diabetesatlas.org/atlas/tenth-edition/ (accessed date: January 3, 2025)

Janiesch C, Zschech P, Heinrich K. 2021. Machine learning and deep learning. Electron Markets, 31(3): 685–695.

Jordan MI, Mitchell TM. 2015. Machine learning: trends, perspectives, and prospects. Science, 349(6245): 255–260.

Kaggle. 2024. Diabetes prediction dataset. URL: https://www.kaggle.com/datasets/iammustafatz/diabetes-prediction-dataset (accessed date: October 17, 2024)

Kurt O. 2024. Model-based prediction of water levels for the Great Lakes: a comparative analysis. Earth Sci Inform, 17(3): 3333–3349.

Laakso M, Kuusisto J. 2014. Insulin resistance and hyperglycaemia in cardiovascular disease development. Nat Rev Endocrinol, 10(5): 293–302.

Lin X, Xu Y, Pan X, Xu J, Ding Y, Sun X, Song X, Ren Y, Shan PF. 2020. Global, regional, and national burden and trend of diabetes in 195 countries and territories: an analysis from 1990 to 2025. Sci Rep, 10(1): 14790.

Ma CX, Ma XN, Guan CH, Li YD, Mauricio D, Fu SB. 2022. Cardiovascular disease in type 2 diabetes mellitus: progress toward personalized management. Cardiovasc Diabetol, 21(1): 74.

Modak SKS, Jha VK. 2024. Diabetes prediction model using machine learning techniques. Multimed Tools Appl, 83(13): 38523–38549.

Mohapatra SK, Das A, Mohanty MN. 2023. Application of ensemble learning–based classifiers for genetic expression data classification. Data Science for Genomics, Academic Press, pp: 11–23.

Rastogi R, Bansal M. 2023. Diabetes prediction model using data mining techniques. Meas Sens, 25(21): 100605.

Ren J, Lee SD, Chen X, Kao B, Cheng R, Cheung D. 2009. Naive Bayes classification of uncertain data. Ninth IEEE Int Conf Data Min, pp: 944–949.

Talukder MA, Islam MM, Uddin A, Kazi M, Khalid M, Akhter A, Moni MA. 2024. Toward reliable diabetes prediction: innovations in data engineering and machine learning applications. Digit Health, 10: 1–26.

Tasin I, Nabil TU, Islam S, Khan R. 2022. Diabetes prediction using machine learning and explainable AI techniques. Healthc Technol Lett, 10(1–2): 1–10.

Tigga NP, Garg S. 2020. Prediction of type 2 diabetes using machine learning classification methods. Procedia Comput Sci, 167: 706–716.

Varma KVSRP, Rao AA, Lakshmi TSM, Rao PVN. 2014. A computational intelligence approach for a better diagnosis of diabetic patients. Comput Electr Eng, 40(5): 1758–1765.

WHO. 2024. World health organization. URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diabetes (accessed date: January 3, 2025)

Zhao S, Zhang B, Yang J, Zhou J, Xu Y. 2024. Linear discriminant analysis. Nat Rev Methods Primers, 4(1): 70.

Zhou H, Xin Y, Li S. 2023. A diabetes prediction model based on Boruta feature selection and ensemble learning. BMC Bioinform, 24(1): 224.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1617721

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 885-890 / May 2025

TRANSFORMATION OF GLUCOSE INTO HMF AND FURFURAL IN HYDROTHERMAL REACTION CONDITIONS

Koray ALPER[1]*

[1]*Zonguldak Bulent Ecevit University, Department of Environmental Protection Technologies, 67100 Zonguldak, Türkiye*

Abstract: This study focused on the conversion of glucose into high-value chemicals, specifically furfural (FFR) and 5-hydroxymethylfurfural (HMF), through hydrothermal reaction processes. Glucose was decomposed under subcritical water conditions (160-220 °C) in a Teflon-lined stainless-steel reactor, and the evolution of FFR and HMF products was examined over residence times ranging from 30 to 210 minutes. The highest yields of FFR and HMF were achieved at a temperature of 220 °C and a residence time of 180 minute. Increasing the temperature from 160°C to 220°C and extending the residence time from 30 to 180 minutes enhanced the hydrolysis of glucose. The yields of FFR and HMF were determined using high performance liquid chromatography (HPLC).

Keywords: Furfural, 5-hydroxymethylfurfural, Hydrothermal reaction, HPLC

***Corresponding author:** Zonguldak Bulent Ecevit University, Department of Environmental Protection Technologies, 67100 Zonguldak, Türkiye
E mail: korayalper@beun.edu.tr (K. ALPER)
Koray ALPER https://orcid.org/0000-0001-6845-2087

Received: January 11, 2025
Accepted: April 25, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Alper K. 2025. Transformation of glucose into HMF and furfural in hydrothermal reaction conditions. BSJ Eng Sci, 8(3): 885-890.

1. Introduction

Biomass, a plentiful and renewable carbon-neutral resource, holds immense potential for producing energy and chemicals to power sustainable industries of the future (Bridgwater, 2003). Processes aimed at biomass valorization for the production of chemicals and fuels are gaining increasing attention as a pathway to sustainable manufacturing (Ragauskas et al., 2006). Such developments can be achieved through clean, selective, and efficient processes utilizing renewable raw materials, with non-edible plant biomass serving as a globally abundant carbon source for producing bio-chemicals, bio-fuels, and bio-energy (Cantero et al., 2015). Furan-based platform compounds, such as FFR and HMF, can be derived from biomass through hydrothermal conversion and further transformed into value-added chemicals and liquid fuels via hydrodeoxygenation, promoting efficient biomass utilization and mitigating environmental issues caused by excessive fossil fuel use (Zhao et al., 2021). The schematic representation of high-value applications of FFR and HMF is presented in Figure 1. Biomass, sourced from agricultural residues, wood, and herbaceous energy crops, consists of biopolymers like cellulose (35–50%), hemicellulose (25–30%), and lignin (25–30%) (Aida et al., 2007). Cellulose, which serves as a source of glucose, is a major constituent of biomass (Bobleter, 1994). Glucose is a versatile molecule with great potential as a starting material for various productive processes, such as serving as feedstock in biological systems for the production of bio-fuels and bio-chemicals (Corma et al., 2007). FFR is produced from pentoses such as xylose, arabinose, and lyxose, whereas HMF is obtained from hexoses, with fructose and glucose being the most prevalent sources (van Putten et al., 2013). FFR, a furan ring containing a heteroatom and an aldehyde group, serves as an organic solvent to enhance the selectivity of aromatics and unsaturated compounds in various chemical reactions (Mariscal et al., 2016). FFR, with its aldehyde group and furan ring, is a highly reactive chemical used as a feedstock for producing over 80 types of value-added chemicals and liquid fuels (Bohre et al., 2015). FFR is a significant precursor for liquid fuels, as key biofuel components such as 2-methylfuran (MF), 2,5-dimethylfuran, and methyltetrahydrofuran (MTHF) can be obtained through its hydrogenation (Ahmad et al., 2022). The reactive chemical properties of HMF unlock a wide range of opportunities for valuable applications. HMF, with an additional hydroxyl group on C5 compared to FFR, exhibits greater reactivity, enabling a wider range of high-value applications due to its enhanced chemical properties (Kucherov et al., 2018). 2,5-Furandicarboxylic acid (FDCA), a key derivative of HMF, is among the most thoroughly researched and is obtained through the oxygenation of HMF (Sajid et al., 2018). Additionally, HMF can be transformed into liquid fuels such as 2,5-dimethylfuran and 5-alkoxymethylfurfural ethers through hydrogenolysis and esterification processes (Wang et al., 2014).

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

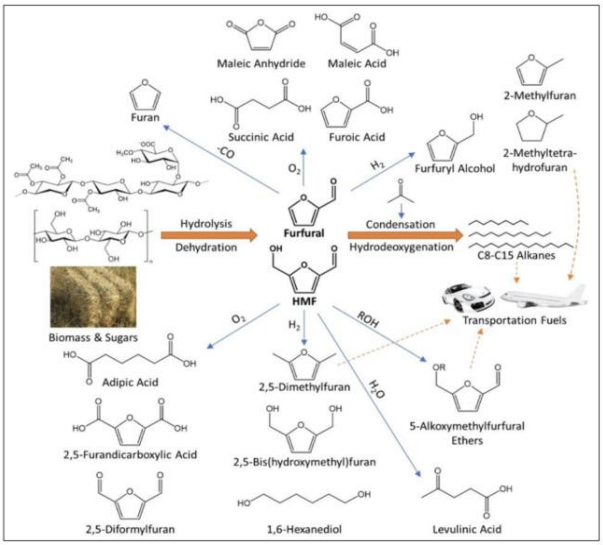


Figure 1. Pathways for high-value applications of FFR and HMF (Zhao et al., 2021).

The literature presents studies on the conversion of glucose into HMF and FFR. The study by Knezevic and colleagues provides valuable insights into the hydrothermal conversion of glucose, offering essential knowledge for sustainable chemical production processes (Knezevic et al., 2009). The yield of HMF from glucose reached 64% under conditions of 7 MPa, 200 °C, and 1.5 hours (Lee et al., 2016). Achieved simultaneous production of FFR (42%) and HMF (34%) from glucose, focusing on optimizing yields (He et al., 2020). Attained high efficiency in transforming glucose and various carbohydrates into FFR and HMF utilizing heterogeneous acid catalysts (Agirrezabal-Telleria et al., 2014). Optimized the production of HMF and FFR from glucose using dilute acid catalysts, achieving the best results at moderate temperatures and low acid concentrations (Jaswal et al., 2022; Thunyaratchatanon et al., 2021).

The primary objective of this study is to investigate the potential for producing the high-value-added compounds 5-hydroxymethylfurfural (HMF) and furfural (FFR) through the chemical conversion of glucose, a renewable and sustainable carbon source, within a hydrothermal reaction medium. Considered as alternatives to fossil fuels, such biochemicals hold strategic importance for environmentally friendly energy and material production, aligning with the principles of green chemistry. The glucose conversion process presents significant potential, both scientifically and industrially, particularly for obtaining platform chemicals in biomass-based chemical synthesis. In this study, the chemical transformations of glucose under hydrothermal conditions were systematically investigated within a temperature range of 160–220 °C and residence times varying from 30 to 210 minutes. The reactions were conducted in Teflon-lined stainless steel reactors, and the liquid products obtained from each temperature-time combination were prepared using the solid-phase extraction (SPE) method. Quantitative analysis of the resulting products was performed using high-performance liquid chromatography (HPLC). For this analysis, a C18 column was employed, and HMF and FFR compounds were detected using a UV detector at a wavelength of 284 nm, with retention times of 7.17 and 10.05 minutes, respectively. A methanol/water mixture (18:82, v/v) was used as the mobile phase, with the flow rate set at 0.9 mL/min. This analytical method ensured the accurate and reproducible measurement of HMF and FFR yields, thereby enhancing the scientific reliability and methodological rigor of the study. The research findings indicate that the HMF yield reached 13,946.08 mg/L, particularly at 220 °C with a residence time of 180 minutes, while the FFR yield reached 864.21 mg/L at a residence time of 210 minutes. These results demonstrate that glucose can effectively decompose under appropriate hydrothermal conditions and that this decomposition can be controllably channeled into high-yield chemical synthesis. In conclusion, this study offers valuable insights into the chemical conversion processes of biomass-derived feedstocks and strongly supports the potential of glucose for sustainable chemistry applications. Furthermore, the employed analytical approach (HPLC) stands out as a sensitive and reliable tool for evaluating such conversion reactions.

2. Materials and Methods

2.1. Chemical and Materials

D -Glucose (P99%) was purchased from Sigma-Aldrich. HMF (99%) was obtained from Merck, while FFR (99%) was sourced from Acros-Organics. All commercial reagents were used as supplied without additional purification. Ultrapure water (conductivity of 18.3 MΩ cm^{-1}) was generated using a Zeneer Power I instrument from Human Corporation, USA, and was utilized to the mobile phase. HPLC grade methanol (≥99.9%) was sourced from Sigma-Aldrich and utilized for both the mobile phase and solid phase extraction (SPE).

2.2. Experimental Studies

A total of 2.0 g of glucose was weighed into a 50 mL stainless-steel reactor, mixed with 15.0 mL of distilled water, sealed, and placed in a preheated oven at 160, 180, 200, or 220 °C for the required residence times before being cooled to room temperature. The slurries from the reactor were filtered using a Buchner funnel with filter paper to separate the solid and liquid products, after which the liquid product was subjected to solid-phase extraction to collect FFR and HMF. The resulting liquid product was subjected to solid-phase extraction (SPE) for the selective isolation of FFR and HMF, following the methodology outlined by Driffield et al., with minor modifications to suit the experimental setup (Driffield et al., 2005). The cartridge was conditioned by sequentially passing 2 mL of methanol and 2 mL of water, after which it was loaded with 1 mL of the liquid product derived from glucose. The cartridge was dried using dry air, eluted with 2 mL of methanol, and the eluate was transferred to a vial, filtered through a 0.45 µm membrane, and analyzed by HPLC-UV.

2.3. HPLC Analysis

After the reaction and extraction, the samples were analyzed using high-performance liquid chromatography (Thermo Dionex Ultimate 3000, USA), equipped with a UV detector, a pump system, and an automatic sample injector. The separation was performed using a C18 column (5 µm, 120Å, 4.6 × 250 mm; Thermo Acclaim 120) with a constant injection volume of 10 µL. Based on the work of Ariffin et al. a methanol/water mixture was used as the mobile phase (Ariffin et al., 2014). The mobile phase consisted of methanol and water (18:82, v/v) with a flow rate of 0.9 mL/min. The column was washed with methanol between injections to minimize sample carryover. HMF and FFR were quantified at 284 nm using a UV detector, with retention times of 7.187 minutes for HMF and 10.133 minutes for FFR. The chromatograms of FFR and HMF obtained from the experiment conducted at 220°C for 180 minutes are shown in Figure 2. The data were analyzed using the licensed Chromeleon Client software (Dionex Corporation, USA).

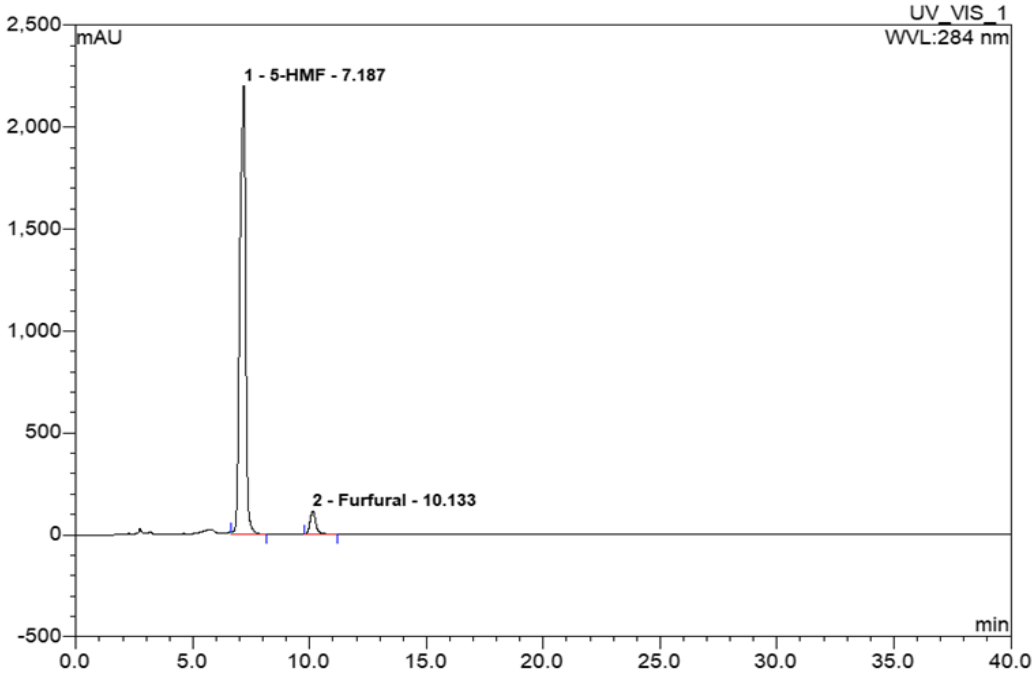


Figure 2. Chromatograms of FFR and HMF.

3. Results and Discussion

The results presented in Table 1 and visualized in Figures 3 and 4 clearly demonstrate the significant influence of both temperature and residence time on the yields of HMF and FFR during the hydrothermal conversion of glucose.

Table 1. HMF and FFR amounts at specific reaction temperatures and times

Temperature (°C)	Reaction time (min)	HMF (mg/L)	FFR (mg/L)
160	60	0.13	0.01
180	60	0.64	0.02
200	60	40.53	0.74
220	60	453.28	8.32
220	30	0.19	0.00
220	60	453.28	8.32
220	90	3468.71	74.99
220	120	7590.26	205.58
220	150	11198.55	552.97
220	180	13946.08	700.55
220	210	9640.26	864.21

At a constant reaction time of 60 minutes, a temperature increase from 160 °C to 220 °C led to a substantial enhancement in HMF yield, rising from 0.13 mg/L to 453.28 mg/L, while FFR yield only modestly increased from 0.01 mg/L to 8.32 mg/L (Figure 3). The results show that the increase in temperature has supported the rise in HMF and furfural amounts (Dashtban et al., 2012). This suggests that HMF formation is more sensitive to temperature changes within this range, a trend also supported by the literature (Zhang et al., 2021). When the temperature was fixed at 220 °C, increasing the reaction time progressively boosted product yields up to a critical point. As shown in Figure 4, HMF concentration peaked at 13,946.08 mg/L at 180 minutes, but subsequently decreased at 210 minutes, indicating potential degradation or rehydration to humins or levulinic acid under prolonged thermal exposure (Girisuta et al., 2006). In contrast, FFR yield continuously increased across the entire time range, reaching its maximum (864.21 mg/L) at 210 minutes. This may reflect the higher thermal stability of FFR and a possible delay in its formation pathway, potentially via intermediate degradation of sugars such as xylose or arabinose, even if glucose was the initial feedstock (Agirrezabal-Telleria et al., 2014). These results underline that the optimization of both reaction

temperature and duration is essential to maximize specific target compounds. Moreover, the steep increase in HMF yield between 90 and 180 minutes (from 3,468.71 mg/L to 13,946.08 mg/L) emphasizes a window of high productivity that could be exploited in continuous flow or semi-batch systems for industrial applications. These findings align with kinetic profiles described in prior studies (He et al., 2020; Jin and Enomoto, 2011), affirming the potential for glucose-based feedstocks to yield platform chemicals under finely controlled hydrothermal conditions. The results strongly support that fine-tuning operational parameters such as temperature and reaction time enables selective production of target compounds, providing a foundation for scalable and sustainable biomass valorization processes.

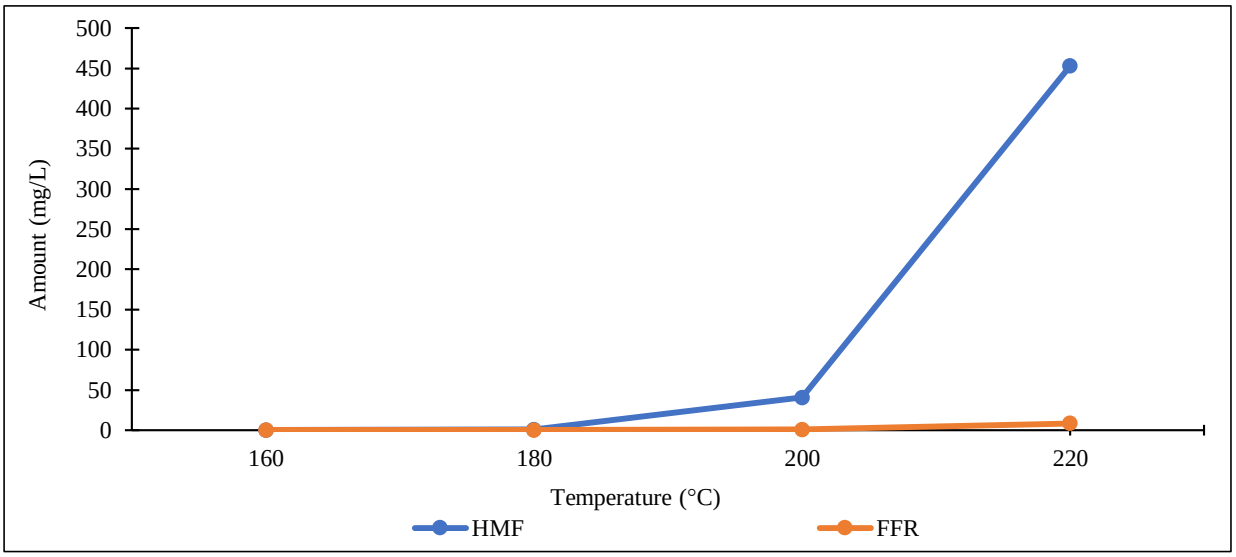


Figure 3. The effect of temperature on HMF and FFR amounts (60 min.).

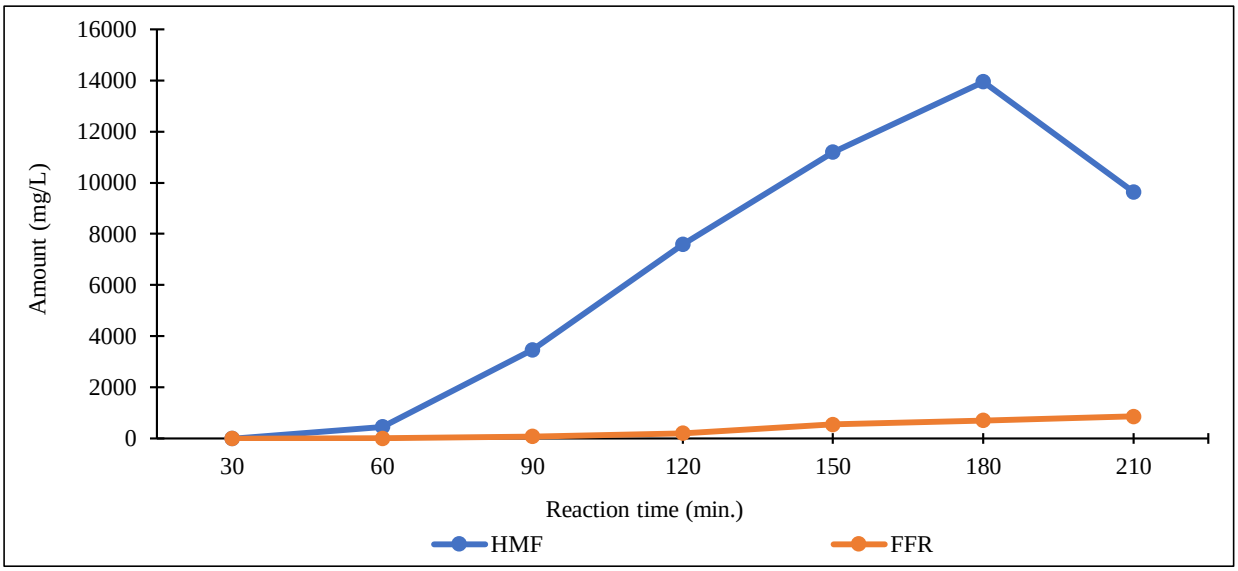


Figure 4. The impact of reaction time on the amounts of HMF and FFR (220 °C).

4. Conclusion

The manuscript explores the hydrothermal conversion of glucose into high-value chemicals, specifically FFR and HMF. Using subcritical water conditions (160-220 °C) in a Teflon-lined stainless steel reactor, the study evaluates the effects of temperature (160°C to 220°C) and residence time (30–210 minutes) on the yields of FFR and HMF. The principal conclusions are enumerated as follows:

- The study effectively focuses on optimizing HMF and FFR yields through controlled reaction temperatures and durations. It identifies optimal conditions (220°C for FFR and 180°C for HMF), showcasing practical applications for bio-based chemical production.
- The use of HPLC analysis ensures precise quantification of product yields, reinforcing the study's credibility. The detailed experimental methodology adds reproducibility and transparency.
- Highlighting the significance of glucose as a

renewable feedstock, the research underscores its potential for sustainable chemical synthesis. The findings contribute valuable insights for industries aiming to reduce reliance on fossil fuels.

This study is well-structured and scientifically robust, offering a meaningful contribution to the field of sustainable biomass valorization. A comparative discussion with catalysts or reaction media could provide deeper insights into optimizing yields. Addressing potential environmental and economic implications of the proposed methods would broaden the research's impact. Exploring scalability for industrial applications would enhance the study's relevance to commercial processes.

Author Contributions

The percentages of the author' contributions are presented below. The author reviewed and approved the final version of the manuscript.

	K.A.
C	100
D	100
S	100
DCP	100
DAI	100
L	100
W	100
CR	100
SR	100
PM	100
FA	100

C=Concept, D=design, S=supervision, DCP=data collection and/or processing, DAI=data analysis and/or interpretation, L=literature search, W=writing, CR=critical review, SR=submission and revision, PM=project management, FA= funding acquisition.

Conflict of Interest

The author declared that there is no conflict of interest.

Ethical Consideration

Ethics committee approval was not required for this study because of there was no study on animals or humans.

References

Agirrezabal-Telleria I, Gandarias I, Arias PL. 2014. Heterogeneous acid-catalysts for the production of furan derived compounds (furfural and hydroxymethyl furfural) from renewable carbohydrates: A review. Catal Today, 234: 42-58.

Ahmad FB, Kalam MA, Zhang Z, Masjuki HH. 2022. Sustainable production of furan-based oxygenated fuel additives from pentose-rich biomass residues. Energ Convers Man-x, 14: 100222.

Aida TM, Sato Y, Watanabe M, Tajima K, Nonaka T, Hattori H, Arai K. 2007. Dehydration of d-glucose in high temperature water at pressures up to 80 MPa. J Supercrit Fluids, 40(3): 381-388.

Ariffin AA, Ghazali HM, Kavousi P. 2014. Validation of a HPLC method for determination of hydroxymethylfurfural in crude palm oil. Food Chem, 154: 102-107.

Bobleter O. 1994. Hydrothermal degradation of polymers derived from plants. Prog Polym Sci, 19(5): 797-841.

Bohre A, Dutta S, Saha B, Abu-Omar MM. 2015. Upgrading furfurals to drop-in biofuels: An overview. ACS Sustain Chem Eng, 3(7): 1263-1277.

Bridgwater AV. 2003. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. Chem Eng J, 91(2-3): 87-102.

Cantero D, Álvarez A, Bermejo MD, Cocero MJ. 2015. Transformation of glucose into added value compounds in a hydrothermal reaction media. J Supercrit Fluids, 98: 204-210.

Corma A, Iborra S, Velty A. 2007. Chemical routes for the transformation of biomass into chemicals. Chem Rev, 107(6): 2411-2502.

Dashtban M, Gilbert A, Fatehi P. 2012. Production of furfural: overview and challenges. J Sci Technol For Prod Process, 2(4): 44-53.

Driffield M, Chan D, Macarthur R, MacDonald S, Brereton P, Wood R. 2005. Single laboratory validation of a method for the determination of hydroxymethylfurfural in honey by using solid-phase extraction cleanup and liquid chromatography. J AOAC Int, 88(1): 121-127.

Girisuta B, Janssen LPBM, Heeres HJ. 2006. A kinetic study on the decomposition of 5-hydroxymethylfurfural into levulinic acid. Green Chem, 8(8): 701-709.

He O, Zhang Y, Wang P, Liu L, Wang Q, Yang N, Yu H. 2020. Experimental and kinetic study on the production of furfural and HMF from glucose. Catalysts, 11(1): 11.

Jaswal A, Singh PP, Mondal T. 2022. Furfural–a versatile, biomass-derived platform chemical for the production of renewable chemicals. Green Chem, 24(2): 510-551.

Jin F, Enomoto H. 2011. Rapid and highly selective conversion of biomass into value-added products in hydrothermal conditions: chemistry of acid/base-catalysed and oxidation reactions. Energy Environ Sci, 4(2): 382-397.

Knezevic D, van Swaaij WPM, Kersten SR. 2009. Hydrothermal conversion of biomass: I, glucose conversion in hot compressed water. Ind Eng Chem Res, 48(10): 4731-4743.

Kucherov FA, Romashov LV, Galkin KI, Ananikov VP. 2018. Chemical transformations of biomass-derived C6-furanic platform chemicals for sustainable energy research, materials science, and synthetic building blocks. ACS Sustain Chem Eng, 6(7): 8064-8092.

Lee R, Harris J, Champagne P, Jessop PG. 2016. CO2-catalysed conversion of carbohydrates to 5-hydroxymethyl furfural. Green Chem, 18(23): 6305-6310.

Mariscal R, Maireles-Torres P, Ojeda M, Sádaba I, Granados ML. 2016. Furfural: a renewable and versatile platform molecule for the synthesis of chemicals and fuels. Energy Environ Sci, 9(4): 1144-1189.

Ragauskas AJ, Williams CK, Davison BH, Britovsek G, Cairney J, Eckert CA, Tschaplinski T, 2006. The path forward for biofuels and biomaterials. Science, 311(5760): 484-489.

Sajid M, Zhao X, Liu D. 2018. Production of 2,5-furandicarboxylic acid (FDCA) from 5-hydroxymethylfurfural (HMF): recent progress focusing on the chemical-catalytic routes. Green Chem, 20(24): 5427-5453.

Thunyaratchatanon C, Sinsakullert W, Luengnaruemitchai A, Faungnawakij K. 2021. 5-Hydroxymethylfurfural production from hexose sugars using adjustable acid-and base-functionalized mesoporous SBA-15 catalysts in aqueous media. Biomass Convers Biorefin, 11: 1733-1747.

van Putten RJ, Van Der Waal JC, De Jong ED, Rasrendra CB, Heeres HJ, de Vries JG. 2013. Hydroxymethylfurfural, a versatile platform chemical made from renewable resources. Chem Rev, 113(3): 1499-1597.

Wang T, Nolte MW, Shanks BH. 2014. Catalytic dehydration of C6 carbohydrates for the production of hydroxymethyl furfural (HMF) as a versatile platform chemical. Green Chem, 16(2): 548-572.

Zhang J, Li DN, Yuan HR, Wang SR, Chen Y. 2021. Advances on the catalytic hydrogenation of biomass-derived furfural and 5-hydroxymethylfurfural. J Fuel Chem Technol, 49(12): 1752-1766.

Zhao Y, Lu K, Xu H, Zhu L, Wang S. 2021. A critical review of recent advances in the production of furfural and 5-hydroxymethylfurfural from lignocellulosic biomass through homogeneous catalytic hydrothermal conversion. Renew Sustain Energy Rev, 139: 110706.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1593337

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 - 8991

Research Article
Volume 8 - Issue 3: 891-898 / May 2025

INVESTIGATING THE IMPACT OF INSULATION THICKNESS ON CONDENSATION LEVELS: A CASE STUDY IN SİVAS, TÜRKİYE

Cenker AKTEMUR[1]*, Mutlu Tarık ÇAKIR[1]

[1]*Sivas Science and Technology University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, 58030, Sivas, Türkiye*

Abstract: This extensive research has resulted in the ingenious design of an intelligent composite wall, which incorporates internal and external thermal insulation to effectively deal with the cold climate conditions prevalent in Sivas, Türkiye. Outdoor temperatures in this region drop significantly at night, requiring effective thermal management solutions. The main focus of this research is to determine the minimum insulation thickness required to prevent surface condensation on the walls, which can cause potential problems. In particular, the study helps to identify the effect of thermal insulation on these variables through a series of elaborate and precise heat and mass transfer calculations, rigorously carried out over a range of different scenarios, including indoor and outdoor temperature conditions and variations in relative humidity. The results of such extensive analysis clearly show that the effectiveness and efficiency of thermal insulation becomes increasingly pronounced and evident as the indoor relative humidity exceeds the 70% threshold. In situations where the internal relative humidity is low, the need for increased insulation thickness approaches negligible or minimal levels. Significantly, the comprehensive analysis shows that when the outdoor relative humidity is increased significantly, from 50% to 80%, there is an inverse and measurable increase in the water vapour partial pressure in the external environment. An increase in the water vapour partial pressure results in a reduction in water vapour transmission and therefore reduces the possibility of condensation in that environment.

Keywords: Condensation, Thermal insulation, Cold climate, Relative humidity

Corresponding author: Sivas Science and Technology University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, 58030, Sivas, Türkiye
E mail: cenker.aktemur@sivas.edu.tr (C. AKTEMUR)
Cenker AKTEMUR https://orcid.org/0000-0001-9045-832X
Mutlu Tarık ÇAKIR https://orcid.org/0000-0002-0107-594X

Received: November 29, 2024
Accepted: April 30, 2025
Published: May 15, 2025

Cite as: Aktemur C., Çakır MT. 2025. Investigating the Impact of insulation thickness on condensation levels: A case study in Sivas, Türkiye. BSJ Eng Sci, 8(3): 891-898.

1. Introduction

Following the signing of the European Green Deal in developed nations in 2020, there has been a notable surge in energy efficiency research, particularly concerning buildings. The building sector alone contributes nearly 30% to global energy consumption, highlighting substantial potential for energy conservation through efficiency measures. Among these, insulation stands out as a primary application within buildings, aimed at minimizing heat losses. Given that heating and cooling operations constitute approximately 80% of a building's energy consumption, insulation emerges as a widely adopted strategy for reducing energy expenditures. Additionally, appropriate insulation can be used against condensation (Çağman and Ünver 2023). Condensation is the process by which a gas turns into a liquid when a substance in the liquid phase comes into contact with a substance in the gas phase. This phenomenon can occur naturally as a result of the cooling of water vapor in the atmosphere, or it can occur when moisture leaking into a room hits a cold surface. Condensation on building walls often occurs as a result of water vapor coming into contact with the cold surfaces of building materials. In particular, factors such as inadequate insulation or wrong choice of building material can increase the risk of condensation. Condensation not only damages building materials, but can also reduce indoor air quality and promote mold growth, which can cause serious health and cost problems for both building owners and occupants (Kaynaklı et al., 2018).

Upon reviewing existing literature, it is apparent that research focusing on the examination of wall condensation is somewhat scarce. In a study conducted by Kaynakli et al. (2018), the optimization of thermal insulation thickness for building exterior walls was explored, incorporating various insulation methods with equivalent thermal resistance while considering condensation factors. Their investigation aimed to ascertain the minimum insulation thickness, known as the optimal insulation thickness, necessary to prevent condensation within the building structure. Results indicated that the optimal insulation thickness tended to increase with rising internal temperature, internal relative humidity, and external relative humidity. Notably, the type of insulation method employed was found to have minimal impact on the optimal insulation thickness under

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

conditions of low to moderate indoor relative humidity. Furthermore, the study revealed that external insulation applications generally yielded superior outcomes in scenarios characterized by high internal and external relative humidity levels. Arslan and Kose (2006) conducted a comprehensive investigation into optimal insulation thickness, considering condensation dynamics in existing structures within Kütahya, renowned for its cold climate among Turkish cities. Their analysis extended to assessing the impact of condensing vapor on exergy. Through optimization processes, they derived optimal insulation thicknesses of 0.060, 0.065, and 0.075 meters, achieving energy savings rates of 74.9%, 76.3%, and 78.8%, respectively, across varying internal temperatures of 18, 20, and 22°C. Consequently, notable reductions in air pollutants were realized. Yamankaradeniz (2015) endeavored to minimize thermal insulation thickness, accounting for condensation risks on exterior walls. Findings indicated a correlation between increased indoor temperature, relative humidity, and outdoor relative humidity with augmented insulation requirements, while outdoor temperature increments led to decreased insulation needs. The researcher highlighted the potential risk of condensation on inner or outer insulation surfaces resulting from alterations in vapor diffusion resistance of insulation materials. Kon and Caner (2022) delved into the mold and moisture susceptibility of exterior walls, evaluating six wall types and three insulation materials. Their analysis encompassed uninsulated and insulated walls, considering moisture and mold proliferation attributed to dew point temperatures. Optimal insulation thicknesses varied, with hemp wool and hollow brick presenting the highest values for electrical energy sources. For insulated walls, the study identified critical internal humidity thresholds triggering mold and moisture formation as 78% in Izmir and 69% in Erzurum. Aelenei and Henriques (2008) aimed to delineate external environmental conditions conducive to condensation formation on building surfaces. Recognizing the sensitivity of building exterior temperatures to convective and radiative fluxes, their investigation entailed a comprehensive analysis of convective and radiative heat transfer coefficients across diverse climate scenarios and building envelope characteristics. Results underscored the pivotal roles of convection and air moisture content in driving surface condensation on building facades.

Bellia and Minichiello (2003) introduced TMCE (Thermal and Moisture Control for Envelopes), a user-friendly software tool designed for swift and straightforward assessment of the thermal and moisture dynamics of building components. Their analysis adhered to the European Standard ISO 13788:2001. In instances of wintertime condensation, the software facilitated computation of condensed vapor volumes, alongside evaluating the feasibility of complete moisture removal during warmer periods. You et al. (2017) endeavored to elucidate the temporal patterns of moisture condensation on interior surfaces within buildings located in high-humidity climates, employing a combination of numerical and experimental methodologies. A test chamber model was established to forecast air leakage's heat and moisture distribution, with simulation outcomes from FLUENT software juxtaposed against experimental findings. Their investigation scrutinized the influences of outdoor air temperature, humidity, and wind speed on moisture condensation, revealing significant impacts on condensation onset, duration, and intensity. From experimental data, they developed two regression equations delineating the interplay between indoor air temperature, humidity, and air leakage factors. Cho et al. (2016) integrated TRNSYS simulation with TRNFLOW to assess year-round condensation dynamics within an office building in Tokyo, Japan, even during periods when the air conditioning system remained inactive. Their evaluation considered the absorption-desorption characteristics of building materials and office papers, alongside airflow dynamics throughout the structure. Findings indicated predominant wintertime condensation, particularly in non-air-conditioned central sections such as the top floor. Tronchin et al. (2023) delved into the risk of interstitial condensation between interior walls and insulation within extant buildings across various European countries. They meticulously assessed water content in insulation (WCI) employing diverse materials, including natural fibers, mineral fibers, and synthetic alternatives. The study meticulously considered different climatic zones and scrutinized single-family dwellings constructed between 1945 and 1969. Simulations were conducted, taking into account the application scenario, the chosen stratigraphic composition, and the exposure of the existing building system. Findings indicated the occurrence of interstitial condensation, notably concerning mineral and natural insulation materials, particularly within the climatic contexts of Oslo and Brussels. The study by Küçüktopçu and Cemek (2021) utilized the finite element method to simulate temperature distributions within various wall constructions (solid brick, Ytong, concrete) in poultry facilities across diverse climatic zones within Türkiye. The research spanned cities with distinct climatic profiles, including Antalya, Samsun, Ankara, and Erzurum. Their findings highlighted a higher incidence of latent condensation in Ankara and Erzurum, characterized by lower outdoor temperatures (-0.50 and 6.30 ºC) compared to the other cities. Consequently, they recommended the installation of vapor barrier materials on the warm side of walls to mitigate latent condensation risks. Unal (2019) analyzed condensation and vapor diffusion resulting from differently positioned insulation within walls in Mardin province, Türkiye. By constructing six distinct wall models with uniform insulation thickness of 20 cm, evaporation and condensation levels were quantified, with 2 cm of interior plaster and 3 cm on the exterior applied to unreinforced concrete walls. Results indicated that the worst-performing wall structure in

terms of condensation and evaporation occurred in the insulated wall's central position, followed by the inner position. Notably, no condensation was observed on externally insulated walls. Hatipoğlu et al. (2022) modeled various compound wall configurations for Yalova city, Türkiye, utilizing the TS 825 computer program. Condensation analyses were conducted between each wall layer for every wall type, identifying critical temperatures. They observed condensation within walls with insufficient insulation and delineated specific requirements for each wall type to forestall condensation. Çağman and Enver (2023) investigated condensation levels between layers of the three most prevalent wall types in Kütahya city, Türkiye. Employing the Glaser Diagram Method and considering climate data, they quantified condensation amounts. Wall 3 exhibited condensation levels of 0.001696833 kg/m2.h at 0ºC and 0.002142743 kg/m2.h at -21ºC, attributed to low outdoor temperatures. In comparison to previous work that focused largely on minimizing insulation thickness for efficiency in the usage of energy or overall condensation danger, the current work directly analyzes the role of insulation thickness on the occurrence of condensation within a cold climate area (Sivas, Türkiye). The unique climatic properties of Sivas, with extreme temperatures and higher winter humidity, require that the accumulation of moisture in insulated structures be better examined. While earlier works have focused on the occurrence of risks due to condensation in various climates, the gap in research on locations that have severe winters and wide indoor-outdoor temperature gradients, where high levels of condensation danger, exists. This work fills that gap by assessing the required thickness of insulation with varying indoor and outdoor humidities, setting thresholds for saturation, and making a long-term analysis on the insulation. The findings of the work assist in the development of efficient insulation techniques for cold climates that ensure both thermal efficiency and control over dampness, which are important towards the sustainability and durability of building infrastructure. The main aim in this paper, dealing with the detailed analysis of the problem, is to drastically reduce the losses of heat as well as the amount of water vapour that would be transferred by applying the principles of saturation pressure and the partial pressure of water vapour, precisely at the temperature inherent in each given specific layer of the building material. Further in the paper, attention is paid to a given wall of the building, which is supposed to involve applications of internal and external insulation in radically reducing the possible risk of condensation. The minimum thickness of insulation is duly calculated. This is critical to the cautious design of the whole wall system and ensuring it will be effective in maintaining the integrity of the thermal structure and preventing possible moisture problems. Thickness of thermal insulation plays an important role in building and efficiency in buildings, considering that moisture can enhance the rate of heat transfer in highly moistened regions, especially in cold climate conditions. This directly impinges on the comfort of the indoor environment and heating costs in the general energy consumption needed to create a livable atmosphere. Thus, the specific city selected for this examination is Sivas, which is within the 4th degree day zone in Türkiye (Kan, 2022). The winters are really cold and often come with substantial snowfall.

2. Materials and Methods

2.1. Heat Conduction and Water Vapor Diffusion of Wall Structure

The current study was conducted in Sivas, Türkiye, which has a continental climate that is exemplified by cold, snowy winters and warm summers. The climatic conditions of Sivas are suitable to induce condensation, and hence the area is appropriate to study the implications of insulation thickness on condensation levels. This research is focused on the link between insulation thickness and condensation occurrence within walls, with emphasis on Sivas, Türkiye's cold climate. The wall assembly in question has several building materials, with internal and external insulation layers. An analysis of heat transfer and water vapor diffusion through mathematical models and simulations was undertaken to determine the level of insulation thickness to prevent condensation.

Figure 1 shows the type of externally and internally insulated walls consisting of different building materials. Since Sivas is in a cold climate region and the outdoor temperature drops considerably at night, a wall with thermal insulation from both the inside and outside is designed. The water vapor resistance of Expanded Polystyrene (EPS) can vary in a wide range depending on its density (μ = 20-100) (Anonymous, n.d.). The water vapor resistance of the thermal insulation material should be low in external insulation applications and high in internal insulation applications (Bademlioğlu et al., 2018). Since the vapor resistance of EPS can vary within desired ranges, it offers suitable options for both external and internal thermal insulation applications. Vapor barriers are used to control the movement of water vapor between building elements. Vapor barriers are used to prevent indoor moisture from reaching insulation materials and damaging them (Lstiburek and Eng (2004). Especially in cold climates, vapor barriers are used to prevent the hot and humid indoor air from coming into contact with the cold air outside. This way, the risk of condensation and moisture damage is reduced (Anonymous, n.d.). Fiber cement is a material that is resistant to decay, cracking and insect damage. These features provide long-lasting and maintenance-free wall covering (Gudayu et al., 2025). Fiber cement is resistant to moisture and water, providing a coating that is not affected by moisture indoors and outdoors (Gorzelanczyk and Schabowicz, 2014). In this study, a number of equations were used in accordance with the literature to perform the analysis (Kaynaklı et al., 2018; Yamankaradeniz, 2015).

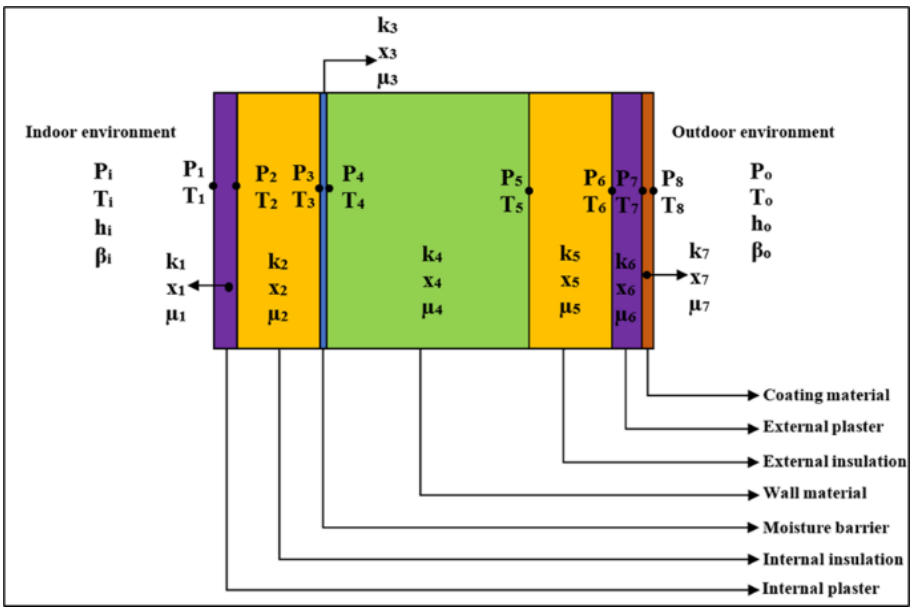


Figure 1. Schematic presentation the wall with internal and external insulation.

Heat flux in steady-state for indoor and outdoor environments (equations 1 and 2):

$$q = h_i(T_i - T_1) \quad (1)$$

$$q = h_o(T_n - T_o \quad (2)$$

Heat flux in steady-state for building material layers (equation 3):

$$q = \frac{k_n}{x_n}(T_n - T_{n+1}) \quad (3)$$

Total heat flux for all wall composition in steady-state (equation 4):

$$q = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{h_i} + \sum\frac{x_n}{k_n} + \frac{1}{h_o}} \quad (4)$$

Similar to heat conduction, the vapor vapour diffision in the indoor and outdoor environments in a wall composition (equations 5 and 6):

$$w = \beta_i(P_i - P_1) \quad (5)$$

$$w = \beta_o(P_n - P_o) \quad (6)$$

The vapor vapour diffusion in steady-state for building material layers (equation 7):

$$w = \frac{\mu_{p_n}}{x_n}(P_n - P_{n+1}) \quad (7)$$

The vapor vapour diffision for the all wall composition (equation 8):

$$w = \frac{(P_i - P_o)}{\left(\frac{1}{\beta_i} + 1.5 \times 10^3\left(\sum\frac{x_n}{\mu_{p_n}}\right) + \frac{1}{\beta_o}\right)} \quad (8)$$

Indoor and outdoor water vapor partial pressure (equations 9 and 10):

$$P_i = \theta_i P_{s,i} \quad (9)$$

$$P_o = \theta_o P_{s,o} \quad (10)$$

Vapor permeability resistance (equations 11 and 12):

$$\delta = \frac{1}{\mu_p} \quad (11)$$

$$\delta = \mu\delta_{air} \quad (12)$$

Rearranging equation 13, the vapor vapour diffusion for the all wall composition:

$$w = \frac{(P_i - P_o)}{\left(\frac{1}{\beta_i} + 1.5 \times 10^3(\sum x_n\, k_n) + \frac{1}{\beta_o}\right)} \quad (13)$$

Within the scope of this study conducted for a building within the borders of Bitlis province, data on environmental conditions and other parameters in order to calculate the insulation thickness required to prevent condensation on a wall with a determined structure are given in Table 1 (Kaynaklı et al., 2018; Yamankaradeniz, 2015).

3. Results and Discussion

Figure 2 depicts the requisite thermal insulation thicknesses necessary to forestall condensation, contingent upon fluctuations in outdoor temperature. As outdoor temperatures ascend from -20 to -2°C, the requisite thermal insulation thickness also rises for indoor temperatures of 23, 21, and 19°C. Upon reaching specific thresholds (IT=19°C-OT=-5°C, IT=21°C-OT=-4°C, and IT=23°C-OT=-3°C), thermal insulation becomes unnecessary as condensation ceases to occur. However, the differential pressure between the water vapor inside and that outside becomes increasingly large at lower temperatures, hence raising the possibility of condensation on the walls of buildings to appreciable levels. Thus, with decreasing outdoor temperatures, the anticipated increased thickness of thermal insulation for buildings brings out the crucial importance of artful selection of building materials and architectural designs compatible with prevailing outdoor conditions.

Table 1. Parameters and values used in calculations

Parameter	Value
Building insulation material	EPS
Building wall structure	Vertical Perforated Brick
Building coating material	Fiber cement board
Building vapor barrier	Polyethylene
Indoor temperature	19°C, 21°C and 23°C with a default value of -21°C
Outdoor temperature	-20°C to -2°C with a default value of -15°C
Indoor relative humidity	30% to 65% with a default value of 50%
Outdoor relative humidity	50% to 80% with a default value of 70%
Indoor convection heat transfer coefficient	8.3 W/(m²K)
Outdoor convection heat transfer coefficient	34 W/(m²K)
Thermal conductivity of insulation material	0.040 W/m K
Thermal conductivity of wall structure	0.17 W/m K
Thermal conductivity of coating material	0.20 W/m K
Thermal conductivity of moisture barrier	0.03 W/m K
Thermal conductivity of internal plaster	0.87 W/m K
Thermal conductivity of external plaster	1.40 W/m K
Thickness of wall structure	0.19 m
Thickness of coating material	0.02 m
Thickness of vapor barrier	0.003 m
Thickness of internal plaster	0.02 m
Thickness of external plaster	0.03 m
Resistance factor of internal plaster	10
Resistance factor of external plaster	16.5
Resistance factor of insulation material (left)	100
Resistance factor of vapor barrier	250
Resistance factor of coating material	30
Resistance factor of insulation material (right)	20
Resistance factor of wall material	10

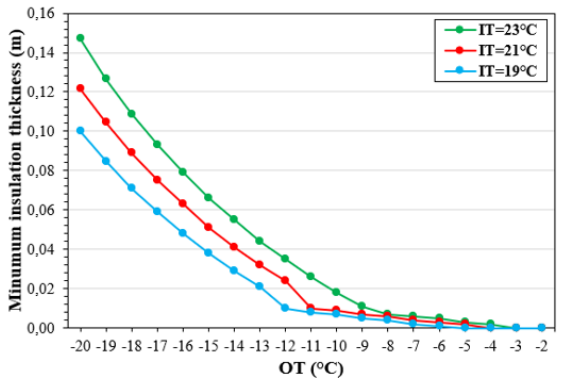


Figure 2. Alteration of required minimum insulation thickness with outside temperature (φ_i=0.5,φ_o=0.7).

Figure 3 shows the dependencies of water vapor flow rates, required to prevent the condensation, by the variation of outdoor temperature with respect to the minimum necessary insulation thickness. It is about this graph being specifically relative to the way how these flow rates are changing in case of variation in outdoor temperature, due to the minimum thickness of the insulation in which this avoidance is reached. And this is known intuitively that when the temperature outside increases, the heat transfer rates, as well as the mass exchange rates, of course, start to decrease. And this tendency and its proper development are, in fact, determined by one important factor, which is the lesser thickness of the thermal insulation layer, with respect to this dynamics. Accordingly, it gives a high number of water vapor transferred from indoors to outdoors. Nevertheless when it attains critical values given by (IT=19°C-OT=-5°C, IT=21°C-OT=-4°C and IT=23°C-OT=-3°C) in which insulation becomes ineffective, then further rises in the outdoor temperature increases the partial pressure of the external atmosphere and hence fall in the water vapor transmission rates.

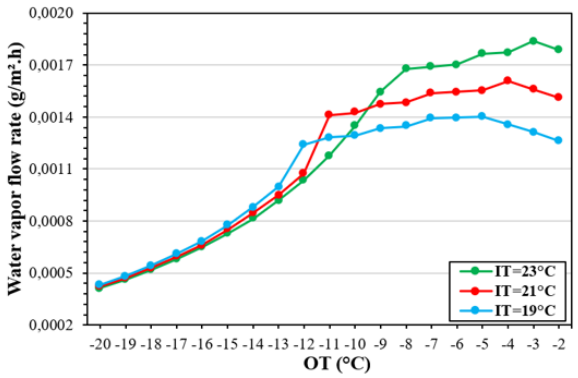


Figure 3. Alteration of water vapor flow rate with outside temperature based on required minimum insulation thickness ($\varphi_i = 0.5, \varphi_o = 0.7$).

Figure 4 is a detailed representation that shows the relationship between the minimum insulation thickness that will prevent condensation with indoor relative humidity levels and also the minimum required thickness of insulation. It can be observed that as the increase in outdoor relative humidity increases from the level of 30% to a higher percentage of 65%, the thickness requirement of thermal insulation also rises correspondingly. When the percentages of relative humidity are at 70% outdoors, the insulation thickness requirements increase from 0.004 meters to 0.090 meters; for relative humidity of 60%, the insulation thickness increases from 0.003 meters to 0.060 meters; and for 50% relative humidity, it develops from 0.002 meters to 0.043 meters. Under the condition of a small internal relative humidity of about 30%, the thickness of thermal insulation will be close to zero since condensation is avoided. However, a higher indoors relative humidity increases the transport of water vapor from indoors to outdoors, which can cause wall condensation and structural damage. To preempt this scenario, insulation thickness must be increased, as thicker insulation limits the passage of warm and moist indoor air outdoors, reducing the likelihood of wall condensation. This underscores the necessity of adjusting insulation thickness to mitigate condensation risks in response to external humidity levels, thereby optimizing energy efficiency, enhancing interior comfort, and nsuring the long-term integrity and performance of the structure.

Figure 5 depicts the various water vapour flow variations, the effect of which needs to be handled properly to avoid any resulting condensation. This variation has been plotted with the changes in indoor relative humidity-a very important factor since once again its value is dependent upon the required minimum thickness of the insulation that is required to be applied. The number of water vapours that diffuse into the wall structure will increase proportionately as the indoor relative humidity increases. Nevertheless, beyond a specific threshold (IRH=35% for ORH=70%, IRH=35% for ORH=60%, and IRH=45% for ORH=50%), condensation takes place, resulting in a reduction in the volume of water vapor that permeates due to the thermal insulation implemented on the wall. Furthermore, as the relative humidity in the external environment escalates, there is a corresponding increase in the necessary thickness of insulation to mitigate the potential for condensation. For this reason, the larger the relative humidity of the outside environment, the smaller is the amount of water vapor transferred from the indoors to the outdoors.

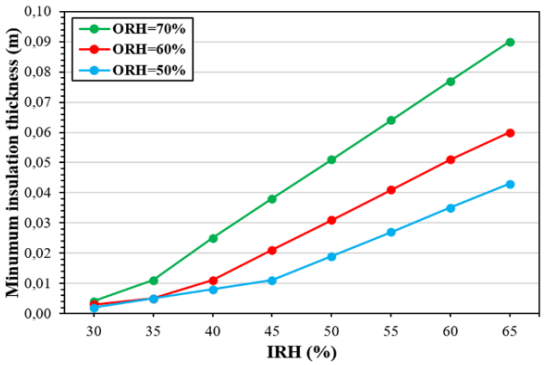


Figure 4. Alteration of required minimum insulation thickness with indoor relative humidity ($T_i = 21°C, T_o = -15°C$).

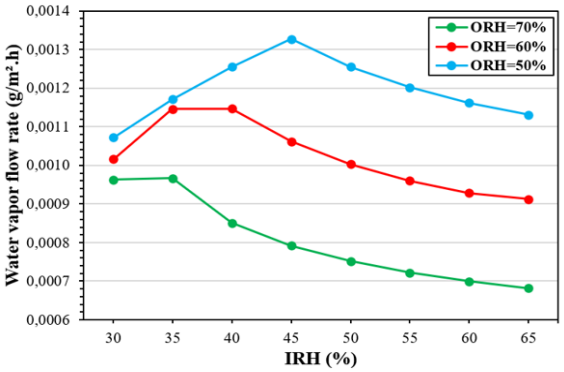


Figure 5. Alteration of water vapor flow rate with indoor relative humidity ($T_i = 21°C, T_o = -15°C$).

Figure 6 shows the minimum insulation thickness required to avoid condensation with variable outdoor relative humidity, organized by the minimum insulation thickness. The minimum thermal insulation thickness necessary to avoid condensation for indoor relative humidity values of 70%, 60%, and 50% increases when the outdoor relative humidity also increases within a range of 0.019 to 0.091 meters, 0.035 to 0.129 meters, and 0.050 to 0.017 meters, respectively. In cases where the outside relative humidity increases from 50 to 80%, the partial pressure of the water vapor in the external atmosphere increases and, hence, reduces the water vapour permeation, thus lowering the condensation risks. However, high rise in outdoor relative humidity limits the capacity of outdoor air for water vapour absorption, which raises the probability of condensation on wall layers. Besides, higher indoor relative humidity may provide higher indoor-to-outdoor water vapour movement, higher thickness of thermal insulation being required in order to avoid probable condensation.

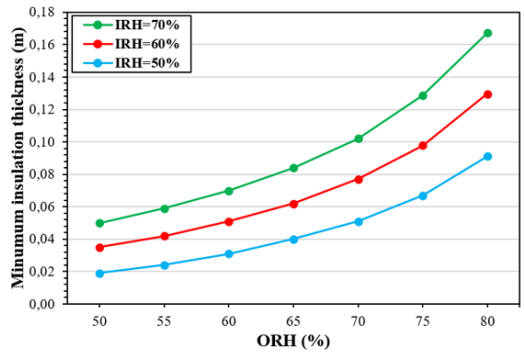


Figure 6. Alteration of required minimum insulation thickness with outdoor relative humidity ($T_i = 21°C, T_o = -15°C$)

Figure 6. Aleration of required minimum insulation thicknes with outdoor relative humidity. $T_i = 21°C, T_o = -15°C$).

Figure 7 shows the variation of the water vapor flow rate to prevent condensation depending on alterations in outdoor relative humidity based on required minimum insulation thickness. It could be seen that in the case of indoor relative humidity values of 70%, 60%, and 50%, water vapor flow rate decreases as outdoor relative humidity increases from 0.00118 to 0.000447 g/m^2.h, from 0.00116 to 0.00047 g/m^2.h, and from 0.00125 to 0.0005 g/m^2.h, respectively. Then, the effect of the increase in thickness of insulation becomes more dramatic, and the water vapor flow rate decreases much more significantly. Also, the indoor relative humidity reaches 70%, when the volume of transferred water vapor decreases much more significantly due to a more substantial thermal insulation effect. The latter reduction is around 11-14% for outdoor relative humidity of 50-65% and 15-24% for outdoor relative humidity of 70-80%.

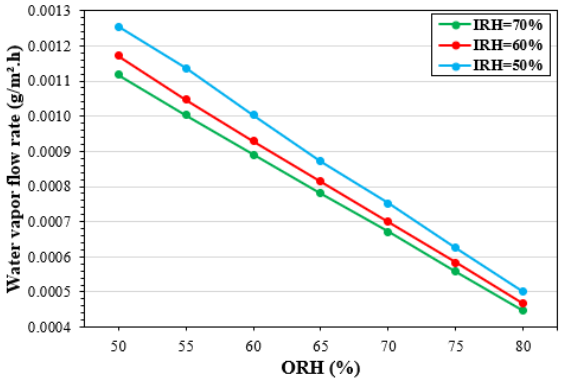


Figure 7. Alteration of water vapor flow rate with outdoor relative humidity ($T_i = 21°C, T_o = -15°C$).

4. Conclusion

The current study examined the impact of insulation thickness on the formation of condensation in buildings located in Sivas, Türkiye, a region that is characterized by cold climatic conditions. The durability of the insulating material, Expanded Polystyrene (EPS), under scrutiny in this research is affected by several factors that include humidity, ultraviolet radiation, mechanical stress, and temperature cycles. In perfect conditions, the life span of the EPS insulation could be more than 30 to 50 years with little degradation. Nevertheless, continuous contact with water and environmental pollutants could make the insulation lose its thermal efficiency through the change in the density and the vapor permeable properties of the material. The success of degradation of the insulation coating depends on its ability to resist moisture absorption and surface degradation. This study used fiber cement boards as an external protection layer, which significantly improves insulation stability by protecting EPS from direct contact with environmental factors. Over time, the insulation performance can reduce by approximately 5-10% over a twenty-year period due to material aging, water retention, and microstructure changes. To prevent long-term degradation, it is necessary to maintain proper vapor barriers and protective coatings, and thus maintain the continued performance of thermal insulation with minimal performance loss over the building's life.

Results from the study established that insulation thickness is central to reducing condensation and maintaining thermal efficiency, especially in environments where there is much variation in temperature and humidity. The findings showed that the increase in the critical factor of condensation due to high indoor humidity levels, lower outdoor temperatures, and higher external humidity increases the potential for the occurrence of condensation. In order to avert this condition, it becomes necessary to use thicker layers of insulation, particularly when indoor relative humidity is above 70%. On the other hand, when the critical factor of condensation is decreased due to lower indoor humidity, higher outdoor temperatures, or better diffusion properties of building materials, the need for thick insulation is less. In these cases, the risk level pertaining to condensation occurrence is low with thinner insulation thickness. Additionally, the study established a saturation thickness, after which additional insulation does not significantly reduce condensation hazards. The study revealed that in moderate conditions, insulation thickness of 4 to 6 cm was sufficient, whereas in cases of high humidity (≥70%), the required insulation was 8 to 10 cm. In cases where external humidity was more than 80%, insulation thickness of more than 10 cm provided decreasing benefits in relation to the prevention of condensation. The study found that a significant reduction in condensation, as compared to the required thickness of insulation, occurs at an external relative humidity of around 70%. At lower humidity levels, the risk of condensation reduces significantly, leading to the need for thinner insulation. However, at external humidity levels above 70%, there is a greater need for thicker insulation to prevent the buildup of moisture in wall assemblies. At external relative humidity levels above 80%, further increases in thickness above 10 cm provide decreasing returns, indicating a point of saturation where further increases in thickness provide little benefit in condensation reduction. This implies that insulation selection needs to be optimized on the basis of both

thermal efficiency and moisture management, thus providing energy conservation while preventing possible structural damage due to moisture accumulation. In conclusion, this study highlights the importance of creating insulation systems with specific climatic conditions in mind. By considering factors like indoor and outdoor humidity, temperature variations, and material properties, one can determine the most appropriate thickness of insulation that has a minimal risk of condensation, increases indoor comfort, and improves the energy efficiency of buildings. Future studies can focus on the transient dynamics of heat and moisture transport and the durability of materials under different climatic conditions to further develop insulation optimization techniques.

Author Contributions

The percentages of the authors' contributions are presented below. All author reviewed and approved the final version of the manuscript.

	C.A.	M.T.Ç.
C	100	
D	100	
S		100
DCP	50	50
DAI	100	
L	100	
W	100	
CR	50	50
SR	100	50

C=Concept, D=design, S=supervision, DCP=data collection and/or processing, DAI=data analysis and/or interpretation, L=literature search, W=writing, CR=critical review, SR=submission and revision.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest in this study.

Ethical Approval Statement

Since this study did not involve any studies on animals or humans, ethics committee approval was not obtained.

References

Aelenei D, Henriques FM. 2008. Analysis of the condensation risk on exterior surface of building envelopes. Energy Build 40(10): 1866-1871.

Anonymous. Air Barrier vs Vapor Barrier: How Do They Differ? URL: https://metalcon.com/blog/air-barrier-vs-vapor-barrier-how-do-they-differ/ (accessed date: May 2, 2025).

Anonymous. n.d. What is EPS? URL: https://epslastro.com/en/what-is-eps/ (accessed date: May 2, 2025).

Arslan O, Kose R. 2006. Thermoeconomic optimization of insulation thickness considering condensed vapor in buildings. Energy Build 38(12): 1400-1408.

Bademlioğlu A, Kaynaklı Ö, Yamankaradeniz N. 2018. The effect of water vapor diffusion resistance factor of insulation materials for outer walls on condensation. Isı Bil Tek Derg, 38(2): 15-23.

Bellia L, Minichiello F. 2003. A simple evaluator of building envelope moisture condensation according to a European standard. Build Environ 38(3): 457-468.

Çağman S, Ünver Ü. 2023. Determination of condensation and its effect on insulation and wall envelope layers. Eur J Tech 13(2): 68-73.

Cho W, Iwamoto S, Kato S. 2016. Condensation risk due to variations in airtightness and thermal insulation of an office building in warm and wet climate. Energies 9(11): 875.

Gorzelanczyk T, Schabowicz K. 2014. Non-destructive testing of moisture in cellulose fiber-cement boards. In: Proceedings of the 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), October 6-10, Prague, Czech Republic, p: 1-8.

Gudayu A D, Getahun D E, Mekuriaw D M, Walelign FT, Ahmed,A S. 2025. Natural fiber reinforced cementitious composites; materials, compatibility issues and future perspectives. Compos Interfaces, 32(3): 363-397.

Hatipoğlu C, Tosun E, Türkmen Ş, Atalay H, Ünver Ü. 2022. Examination of internal condensation in composite walls for different wall types. 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies, 5-8 July, Bangkok, Thailand, pp: 1-6.

Kan M. 2022. Comparison of different insulation materials with thermal conductivity coefficients based on density and temperature for two climate zones. Inter J Thermophys, 43(12):174.

Kaynakli O, Bademlioglu AH, Ufat HT. 2018. Determination of optimum insulation thickness for different insulation applications considering condensation. Teh Vjesn 25: 32-42.

Kon O, Caner İ. 2022. The effect of external wall insulation on mold and moisture on the buildings. Buildings 12(5): 1-21.

Küçüktopcu E, Cemek B. 2021. Determination of hidden condensation on the exterior walls of the poultry farm using finite element method. J Agric Fac Gaziosmanpasa Univ 38(3): 132-136.

Lstiburek J, W, Eng P. 2004. Understanding vapor barriers. ASHRAE J, 46: 40-51.

Tronchin L, Fabbri K, Tommasino MC. 2023. A comparison of thermal insulation with interstitial condensation in different climate contexts in existing buildings in Europe. Energies 16(4): 1-15.

Unal F. 2019. Condensation analysis of the insulation of walls in Mardin Province according to different locations. Eur J Tech 9(2): 253-262.

Yamankaradeniz N. 2015. Minimization of thermal insulation thickness taking into account condensation on external walls. Adv Mech Eng 7(9): 1-11.

You S, Li W, Ye T, Hu F, Zheng W. 2017. Study on moisture condensation on the interior surface of buildings in high humidity climate. Build Environ 125: 39-48.

Black Sea Journal of Engineering and Science
doi: 10.34248/bsengineering.1607313

Open Access Journal
e-ISSN: 2619 – 8991

Derleme (Review)
Cilt 8 - Sayı 3: 899-909 / Mayıs 2025
(Volume 8 - Issue 3: 899-909 / May 2025)

PATLAYICI MADDELER: SINIFLANDIRMA, GÜNÜMÜZ UYGULAMALARI VE GELECEĞE YÖNELİK YÖNELİMLER

Seyhan ATEŞECELOĞLU[1]*, Bülent İMAMOĞLU[2]

[1]*İstanbul Gedik University, Institute of Graduate Studies, PhD Program in Defense Technologies, 34913, İstanbul, Türkiye*
[2]*İstanbul Nişantası University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, 34450, İstanbul, Türkiye*

Özet: Antik Çağ'da askerî ve kültürel amaçlarla sınırlı bir kullanım alanına sahip olan patlayıcı maddeler, barut, dinamit ve modern patlayıcıların icadıyla, hem askerî hem de sivil alanlarda geniş bir kullanım alanına ulaşarak stratejik bir önem kazanmıştır. Bu stratejik önem, bilimsel ve teknolojik yeniliklerle desteklenmiş; devletlerin "bölgesel güç", "küresel güç" ve "süper güç" olma hedefleri doğrultusunda hızlanan silâhlanma yarışlarıyla daha da artmıştır. Bu çalışmada, patlayıcı maddelerin bağ yapıları, temel elementleri ve atom çekirdek ağırlıkları gibi kriterler detaylı bir şekilde incelenmiş; bu sayede, patlayıcı maddelerin kapsamlı bir sınıflandırmasının yapılması hedeflenmiştir. Araştırma kapsamında, nitel yöntem kullanılarak ulusal ve uluslararası literatür taranmış ve mevcut sınıflandırmaların büyük ölçüde kimyasal patlayıcı maddelere odaklandığı, buna karşın nükleer patlayıcıların ihmal edildiği tespit edilmiştir. Bu eksikliği gidermek amacıyla, kimyasal ve nükleer patlayıcıları bir arada ele alan bütüncül bir sınıflandırma sistemi geliştirilmiş ve bir maddenin, patlayıcı olarak kabul edilebilmesi için gerekli kriterler belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada, patlayıcı maddelerin yıkıcı ve yapıcı potansiyelleri ile kullanım alanları değerlendirilmiş; mevcut durumları ve gelecekteki potansiyel yönelimleri bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Çevreye duyarlı ve sürdürülebilir patlayıcı madde teknolojilerinin geliştirilmesi için disiplinler arası araştırmaların teşvik edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu kapsamlı analizle, patlayıcı maddeler konusundaki mevcut bilgi birikimine katkıda bulunarak hem akademik literatüre hem de pratik uygulamalara değer sağlanması amaçlanmaktadır.

Anahtar kelimeler: Patlayıcılar, Patlayıcı sınıflandırması, Kimyasal patlayıcılar, Nükleer patlayıcılar

Explosive Materials: Classification, Current Applications and Future Trends

Abstract: Explosives, which had a limited area of use for military and cultural purposes in antiquity, gained strategic importance by reaching a wide range of uses in both military and civilian fields with the invention of gunpowder, dynamite and modern explosives. This strategic importance has been supported by scientific and technological innovations and has increased even more with the accelerated arms races in line with the goals of states to become "regional power", "global power" and "superpower". In this study, criteria such as the bond structures, basıc elements and atomic nucleus weights of explosive materials are examined in detail; thus, it is aimed to make a comprehensive classification of explosive materials. Within the scope of the research, national and international literature was reviewed using qualitative methodology and it was found that existing classifications largely focus on chemical explosive materials, whereas nuclear explosives are neglected. In order to overcome this deficiency, a holistic classification system that handles chemical and nuclear explosives together was developed and criteria required for a substance to be considered as an explosive were determined. In addition, the destructive and constructive potentials of explosive materials and their areas of use were evaluated in this study, and potential future directions were discussed with a holistic approach. It is emphasized that interdisciplinary research should be encouraged for the development of environmentally friendly and sustainable explosive technologies. With this comprehensive analysis, it is aimed to provide value to both academic literature and practical applications by contributing to the existing body of knowledge on explosives.

Keywords: Explosives, Classification of explosives, Chemical explosives, Nuclear explosives

***Sorumlu yazar (Corresponding author):** Istanbul Gedik University, Greduate School of Education, PhP Program in Defense Technologies, 34913, Istanbul, Türkiye
E mail: ateseceloglu@gmail.com (S. ATEŞECELOĞLU)
Seyhan ATEŞECELOĞLU https://orcid.org/0009-0000-8060-0281
Bülent İMAMOĞLU https://orcid.org/0000-0002-2833-5510

Gönderi: 28 Aralık 2024 **Received:** December 28, 2024
Kabul: 02 Şubat 2025 **Accepted:** February 02, 2025
Yayınlanma: 15 Mayıs 2025 **Published:** May 15, 2025

Cite as: Ateşeceloğlu S, İmamoğlu B. 2025. Explosive materials: classification, current applications and future trends. BSJ Eng Sci, 8(3): 899-909.

1. Giriş

İnsanlık tarihini derinden etkileyen patlayıcı maddelerin ilk olarak ne zaman ve nerede keşfedildiği net olarak bilinmemekle birlikte, Klapötke (2017)'ye göre kara barut, yaklaşık olarak M.Ö. 220 yılında Antik Çin'de keşfedilmiştir. Ancak Antik Yunan tarihçilerinden Thucydides (1898)'in *Thucydides'in Tarihi (Thucydidis Historiae)* adlı eserinde yer alan ateş, kükürt ve zift karışımı (Yunan ateşi), modern patlayıcı maddelerden teknik özellikler ve bileşim açısından farklılık göstermesine rağmen bir tür patlayıcı madde olarak değerlendirilebilir. Bu nedenle, patlayıcı maddelerin tarihte karşılaşılan ilk kullanım örneği, M.Ö. 431-404 yılları arasındaki Peloponnesos Savaşları'na yani M.Ö. V. yüzyıla dayandığından patlayıcı maddelerin keşfinin M.Ö. V. yüzyıl ya da daha öncesine dayandığı anlaşılmaktadır.

This work is licensed (CC BY-NC 4.0) under Creative Commons Attribution 4.0 International License

En ilkel patlayıcı madde türlerinden biri olarak kabul edilebilecek Yunan ateşinin kimyasal formülü ve bileşimi tam olarak bilinmemekle birlikte, bazı kaynaklarda "Grejuva ateşi", "Bahrî ateş", "âteş-i bahrî" ve "âteş-i Rûmî" gibi isimlerle anılmaktadır (Vasiliev, 1943; Özcan, 1992). Bizans savaş stratejisinin merkezinde yer alan ve reçine, nafta, güherçile, kükürt, zift gibi bileşenlerle zenginleştirilen Yunan ateşi, Bizanslılar tarafından 674 – 678 yılları arasında vuku bulan Bizans – Arap Savaşları sırasında etkili bir şekilde kullanılmıştır.

Öte yandan, M.Ö. III. yüzyıl sonlarına doğru Çinliler tarafından keşfedilen kara barutun, zamanla İpek Yolu üzerinden Asya, Orta Doğu ve Avrupa'ya yayıldığına dair yaygın görüş olsa da, bazı görüşlere göre kara barut, Avrupalılar tarafından Çinlilerden bağımsız olarak keşfedilmiştir. Bu iki görüş arasındaki tartışma, kara barutun keşfi ve yayılımına dair kaynakların sınırlı olmasından ve mevcut verilerin yorumlanmasındaki bakış açılarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

Avrupa'da kara barutun patlayıcı özellikleri, İngiliz Roger Bacon (1249) ve Alman Berthold Schwarz (1320) tarafından yürütülen çalışmalar sonucunda keşfedilmiş ve bu keşif, ateşli silâhların geliştirilmesinde uygulanmıştır (Klapötke, 2017). Avrupa'da Kilise'nin etkisi altında şekillenen bilim anlayışının hâkim olduğu Orta Çağ'ın ardından, deneysel yöntemlerin ve gözlemin öne çıktığı Rönesans dönemi, kara barutun hem askerî hem de sivil alanlarda geniş kapsamlı etkiler yaratmasına zemin hazırlamıştır. Bu etkiler sonucunda kara barut, ateşli silâhlar dışında ilk kez 1627 yılında Slovakya'da bir maden kuyusunun açılması sırasında madencilik sektöründe kullanılmaya başlanmış ve zamanla madencilik sektöründeki kullanımı dünya genelinde yaygınlaşmıştır (ÇSGB, 2015).

Yunan ateşi ve kara barutun icadı, patlayıcı maddelerin gelişim sürecinde önemli bir kilometre taşı olup, ilkel patlayıcı maddelerden modern patlayıcı maddelere geçişin temellerini atmıştır. Atılan bu temeller, 1846 yılında İtalyan kimyacı Sobrero tarafından nitrogliserinin (NG) keşfedilmesi ve 1867 yılında İsveçli mucit Alfred Nobel tarafından dinamitin icat edilmesiyle patlayıcı maddeler yeni boyut kazanarak modern patlayıcı maddelere geçiş sağlanmıştır (Akhavan, 2004). Bu gelişmelerle birlikte, özellikle barut gibi patlayıcı maddelerden çok daha güçlü ve etkili patlayıcı maddelere geçilmiştir. Bu süreç, 20. yüzyılın başından itibaren siklotrimetilen–trinitramin (RDX), siklotetrametilen–tetranitramin (HMX) ve nükleer patlayıcılar gibi daha gelişmiş patlayıcı maddelerin icat edilmesine zemin hazırlamış ve bu patlayıcıların üretimi, patlayıcı madde teknolojilerinin askerî, endüstriyel ve bilimsel alanlardaki kullanımında önemli dönüm noktaları oluşturmuştur.

Patlayıcı maddelerin icadı ve kullanım alanlarındaki bu gelişmeler, yalnızca bilimsel ve teknolojik ilerlemeleri değil, aynı zamanda çevresel, güvenlik ve etik sorunlarını da beraberinde getirmiştir. Bu minvalde, bilimsel ve teknolojik gelişmelere paralel olarak modern patlayıcıların artan gücü ve etkinliği, her ne kadar uluslararası ilişkilerde caydırıcılık etkisi yaratarak güç dengesini etkilemiş olsa da, savaşların yıkıcılığını artırmış ve sivil alanlarda yanlış kullanım veya kazara meydana gelen patlamalar, doğada ve canlılar üzerinde onarılması neredeyse imkânsız olan ciddi çevresel ve ekolojik tahribatlara yol açmıştır.

Özellikle, Amerika Birleşik Devletleri tarafından İkinci Dünya Savaşı sırasında uranyum ve plütonyum atomlarının fisyon reaksiyonlarıyla üretilen *"Little Boy"* ve *"Fat Man"* isimli atom bombalarının 1945'te Hiroşima ve Nagazaki'ye atılması, ABD'nin askerî gücünü sergilemiş olsa da, her iki kentteki canlılar ve doğa üzerinde yarattığı tahribat, insanlık tarihinde kalıcı izler bırakmıştır. Bu felaket, savaşın sona ermesinde belirleyici bir rol oynamış ancak doğa ve insanlar üzerinde uzun vadeli ve kalıcı trajik sonuçlar doğurmuştur. Bu durum, uluslararası ilişkilerde devletler arasında önemli bir caydırıcılık unsuru oluşturarak, savaş sonrası dönemde Soğuk Savaş sürecini ve silâhlanma yarışını başlatmasının yanı sıra, patlayıcı maddelerin etik boyutuna ilişkin tartışmaları da gündeme getirmiştir. Bu tartışmalar, patlayıcı maddelerin çevre, ekosistem ve gelecek nesiller üzerindeki etkileri açısından sorgulanmasını ve özellikle de nükleer silâhların yayılmasının önlenmesine yönelik uluslararası çabaların artmasını sağlamıştır. Bu nedenle, patlayıcı maddeler dünya tarihinin en etkileyici icatlarından biri olmakla birlikte, doğa ve insanlar açısından da tehlikeli ve tartışmalı icatlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, patlayıcı maddelerin üretimi ve kullanımı konusunda daha dikkatli ve sorumlu bir yaklaşım gerektiren önemli sorunu gündeme getirmiştir. Ancak patlayıcı maddeler sadece askerî alanda stratejik bir mesele olmadığından, üretiminde ve kullanımında mevcut yararları göz önünde bulundurularak çevre, ekosistem ve canlılar üzerindeki bugünkü ve gelecekteki olumsuz etkilerinin de göz önüne alınması gerekmektedir.

Bu çalışma, dünya tarihinin önemli icatlarından biri olan patlayıcı maddelerin bağ yapıları, türlerine bağlı olarak yapılarındaki temel elementler ve atom çekirdeklerinin ağırlığı dikkate alınarak kapsamlı ve özgün bir sınıflandırma yapılmasını ve patlayıcı maddelerin mevcut kullanım alanları ile gelecekteki potansiyel yönelimlerinin ele alınmasını amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, tarihsel ve teknik bakış açılarıyla patlayıcı maddelerin gelişim süreçleri incelenerek, yenilikçi teknolojiler ve sektöre kazandırılan gelişmeler ışığında çevre, ekosistem ve canlılar üzerindeki etkileriyle uluslararası ilişkilerdeki caydırıcılık etkisi ve stratejik önemi dikkate alınarak patlayıcı maddelerin mevcut durumu ve geleceği hakkında kapsamlı bir anlayış geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu çerçevede yürütülecek çalışma, birincil ve ikincil kaynaklardan yararlanılarak giriş dâhil olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, patlayıcı maddelerin tarihsel süreci ile hem devletler hem de insanlar için

önemi ele alınacak olup; İkinci bölümde patlayıcı maddelerin tanımı üzerinde durularak, patlayıcı maddelerin özgün bir sınıflandırması yapılacaktır. Üçüncü bölümde ise patlayıcı maddelerin mevcut kullanım alanları ve yeni nesil patlayıcılar, çevre dostu teknolojiler ve sürdürülebilirlik konuları üzerinden patlayıcı maddelerin gelecekteki kullanım potansiyeli ele alınacaktır. Son olarak, üç bölümde ele alınan bilgilerin bir sentezi yapılarak patlayıcı maddelerin geleceği ile ilgili öneriler sunulacaktır.

2. Patlayıcı Maddelerin Tanımı ve Sınıflandırılması

2.1. Patlayıcı Madde Tanımı

Patlayıcı maddeler; kimya, fizik, mühendislik, savunma, güvenlik, tıp, uzay ve havacılık gibi geniş bir disiplin yelpazesinde uygulama alanlarına sahip olduğundan patlayıcı madde kavramı, her disiplinin kendi bakış açısıyla ele alınarak kendine özgü bir şekilde tanımlamaya çalışılmasından dolayı literatürde birbirinden farklı tanımlamalar yer almaktadır. Ancak son yıllarda yapılan bilimsel ve mühendislik araştırmaları veya çalışmaları çerçevesinde patlayıcı maddelerin "enerjik maddeler" olarak da adlandırıldığı görülmektedir. Bu farklı adlandırma, her patlayıcı maddenin bir enerjik madde olmasına karşın her enerjik maddenin bir patlayıcı madde olmamasından dolayı patlayıcı maddelerle ilgili alanlarda bir kavram karmaşasına yol açmaktadır. Bu nedenle, patlayıcı maddeler enerjik maddelerin yalnızca bir alt kategorisini oluşturmakla birlikte, sahip oldukları özgün özellikler ve kullanım alanlarındaki farklılıklar nedeniyle "patlayıcı madde" ve "enerjik madde" kavramlarının birbirinin yerine kullanılması, yanlış anlamalara neden olmaktadır. Özellikle terminolojik hassasiyetin önem taşıdığı disiplinler arası çalışmalarda, bu tür yanlış anlamaların ve kavram karmaşasının önlenmesi için her iki kavramın bağlamına uygun bir şekilde ve doğru terminolojiyle kullanılması gerekmektedir.

Literatürde patlayıcı maddelere ilişkin yapılan tanımlamalar, ortak özellikler içeren benzer ifadelerin yanı sıra kavramsal farklılıklar barındıran çeşitli yaklaşımların varlığını ortaya koymaktadır. Bu durum, patlayıcı maddelerin çok yönlü ve karmaşık doğasının farklı disiplinlerden gelen perspektiflerle ele alınmasına olanak sağlamaktadır. Genel olarak, patlayıcı maddeler; moleküler yapıları, kimyasal bileşimleri ve reaksiyon mekanizmaları gibi karakteristik özellikleri ile birlikte, sahip oldukları enerji potansiyelleri temel alınarak tanımlanmaktadır.

Nitekim patlayıcı maddeler, "tek başına veya birbirleriyle karıştırılmış, yarı kararlı durumda bulunan ve bu nedenle atmosferik oksijen gibi reaktanların katılımı olmaksızın hızlı bir kimyasal reaksiyona girebilen katı veya sıvı maddeler" (Meyer vd., 2007) şeklinde tanımlanmaktadır. Bu tanımın dipnotunda, gaz borularındaki sızıntılar, solvent tankları ve kömür madenciliğinde grizu gibi durumlarda gaz karışımlarının genellikle kendiliğinden oluştuğu ve bu nedenle gazların ve gaz karışımlarının da patlayıcı madde kategorisine dâhil edilebileceği belirtilmektedir. Meyer vd. (2007) tarafından yapılan bu tanım, patlayıcı maddelerin yalnızca katı veya sıvı halleriyle sınırlı kalmadığını, aynı zamanda gaz karışımlarının da patlayıcı potansiyel taşıyabileceğini ve bu maddelerin çevresel koşullara bağlı olarak reaksiyona girme özelliklerinin önemini vurgulamaktadır.

Patlayıcı maddeler, ayrıca enerji salınımı ve sonuçları göz önünde bulundurularak, "hızlı kimyasal değişime uğrayabilen ve dışarıdan oksijen desteği olmaksızın, genellikle sıcak gazların salınmasıyla birlikte büyük miktarlarda enerji açığa çıkarabilen madde veya madde karışımı" (Dursun, 2007) olarak tanımlanmaktadır. Öz ve Atakol (2020) ise patlayıcı maddeleri, "ısı veya şok etkisi ile kimyasal değişikliğe uğrayan; yüksek derecede ısı, çok hacimde gaz meydana getiren; katı, sıvı veya gaz halindeki kimyasal madde" olarak tanımlamaktadır. Bu tanım, patlayıcı maddelerin kimyasal değişim sonucu büyük miktarda enerji ve gaz üretme özelliklerine vurgu yapmaktadır.

Benzer şekilde, "darbe, sürtünme, kıvılcım veya şok gibi bir etki sonucu reaksiyona girerek gaz ürünler oluşturan ve bu esnada büyük miktarda basınç, ısı, ışık, ses yayan ve bu reaksiyon için dışardan oksijene ihtiyaç duymayan kimyasal bileşim ve karşımlar" (EGM, 2023) olarak da tanımlanmıştır. Ayrıca, patlayıcı maddeler tetiklenme ve çevreye bağımlı olmadan reaksiyona girme gibi özellikleri dikkate alınarak da tanımlanmıştır. Bu bağlamda, patlayıcı maddeler; ısı, sarsıntı, sürtme, tutuşturma ve darbe gibi dış etkenler yardımıyla fakat çevreden herhangi bir elemanın kimyasal katkısı olmaksızın hızlı bir şekilde detonasyona giren; ısı, ışık, gaz, ses veya basınç meydana getiren katı, sıvı veya gaz hâlindeki kimyasal bileşikler veya karışımlardır (Ateşeceloğlu, 2011). Bu maddeler, kazara veya kasıtlı olarak sağlanan başlatma enerjisi arasında ayrım yapmamaktadır (OSHA, 2017).

Öte yandan, patlama yeteneğine sahip her madde patlayıcı madde olarak kullanılmaya uygun olmadığından, bir maddenin patlayıcı olarak seçilmesi veya tasarlanması sırasında kolay kullanılabilirlik, stabilite, yüksek verimlilik, fiziksel form ve kontrol edilebilirlik gibi özelliklerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu özellikler, patlayıcı maddelerin hem etkinliği hem de güvenliği açısından kritik öneme sahiptir.

Görüldüğü üzere, yapılan bu tanımlar, araştırmacıların farklı kriterleri göz önünde bulundurarak geliştirdiği ve birbirlerini tamamlar nitelikteki açıklamalardır. Ancak patlayıcı madde tanımlanmasından önce, bir maddenin patlayıcı madde olarak kabul edilebilmesi için aşağıda belirtilen kriterlerin en azından tamamını karşılaması gerekmektedir:

1. Doğal yollardan oluşan değil, insan müdahalesiyle özel amaçlar doğrultusunda tasarlanarak üretilmiş olmalıdır.

2. Reaksiyon, kimyasal patlayıcılarda uygun fiziksel bir dış etki, nükleer patlayıcılarda ise yüksek sıcaklık, yüksek basınç veya nötron bombardımanına maruz kalmadıkça kendiliğinden başlamamalıdır.
3. Reaksiyon, ekzotermik olmalıdır.
4. Reaksiyon, hızlı gerçekleşmeli ve patlayıcı maddenin türüne göre reaksiyon ürünlerine dönüşmelidir.
5. Reaksiyon başladıktan sonra, dışarıdan herhangi bir fiziksel veya kimyasal dış desteğe ihtiyaç duymaksızın kendiliğinden tamamlanmalıdır.

Patlayıcı maddelerin diğer enerjik maddelerden ayrılmasını sağlayan temel niteliklerini tanımlayan bu kriterler doğrultusunda patlayıcı madde olarak kabul edilebilecek maddeler için kapsayıcı bir tanımlama yapılacak olursa; patlayıcı maddeler, uygun bir dış etkiyle ani ve kontrolsüz bir şekilde reaksiyon gerçekleştirmesi sonucu büyük miktarda enerji açığa çıkaran ve türüne bağlı olarak farklı bileşim ve özelliklere sahip patlama ürünleri oluşturan maddeler, bileşimler veya bileşikler olarak tanımlanabilir. Bu tanımda;

- *Uygun bir dış etki:* Kimyasal patlayıcılarda fiziksel bir dış etkiyi, nükleer patlayıcılarda ise yüksek sıcaklık, yüksek basınç veya nötron bombardımanını,
- *Açığa çıkan enerji:* Kimyasal patlayıcılarda kimyasal bağ enerjisini, nükleerde ise atom çekirdeği içindeki nükleer bağ enerjisini,
- *Patlama ürünleri*: Kimyasal patlayıcılarda ısı, ışık, ses, şok, gaz ve basınç gibi unsurları, nükleer patlayıcılarda ise radyasyon (özellikle gama ışınları), yüksek sıcaklık, yüksek basınç, nötronlar ve yoğun elektromanyetik dalgalar gibi unsurları

ifade etmektedir. Bu tanım, patlayıcı maddelerin yalnızca kimyasal ve fiziksel özelliklerini değil, aynı zamanda kullanım amacına yönelik tasarımlarında dikkate alınması gereken tüm unsurları da kapsamaktadır. Bu kapsamlı yaklaşım, patlayıcı maddelerin doğasının daha iyi anlaşılmasına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır.

2.2. Patlayıcı Maddeler Sınıflandırması

Patlayıcı maddelerin tarihsel kökeni, büyük ölçüde askerî alandaki stratejik hedeflere ulaşma ve kültürel etkinliklerde eğlence ya da kutlama amacıyla kullanılmalarına dayanmaktadır. Ancak tarih boyunca gerçekleşen teknolojik ilerlemeler ve bilimsel gelişmeler sonucunda patlayıcı maddelerin kullanım alanları oldukça genişlemesine rağmen, günümüzde üzerinde uzlaşılmış evrensel bir patlayıcı madde sınıflandırması bulunmamaktadır. Literatürde, farklı disiplinlerin öncelikleri, hedefleri ve ihtiyaçları doğrultusunda patlayıcı maddelerin özelliklerine farklı ölçüde ağırlıklar verilerek yapılan birbirinden küçük de olsa farklılıklar içeren birçok sınıflandırmaya rastlanılmaktadır. Örneğin, belirli bir disiplin alanında yapılan bir sınıflandırmada patlayıcı maddeler, patlama hızına ve kullanım alanlarına odaklanılarak ele alınırken, başka bir disiplin alanında patlayıcı maddelerin kimyasal yapısı ve reaksiyon mekanizmaları ön plana çıkarılmaktadır. Benzer şekilde, güvenlik alanında yapılan sınıflandırmalarda ise patlayıcı maddelerin tehlike seviyeleri ve kontrol edilebilirlik gibi özellikleri dikkate alınmaktadır. Bu durum, literatürdeki patlayıcı maddelere ilişkin sınıflandırmaların, araştırmacıların disiplin dallarına göre farklılık göstermesi nedeniyle evrensel bir sınıflandırma oluşturulabilmesi için patlayıcı maddelere çok boyutlu bir yaklaşım geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Patlayıcı maddelerin sınıflandırılması konusunda Weinheimer (2002), bir maddenin patlayıcı madde olarak sınıflandırılabilmesi için aşağıdaki 5 koşulun tamamını sağlaması gerektiğini ileri sürmüştür:

1. Kimyasal reaksiyon hızına ilişkin temel koşulları sağlamalıdır.
2. Reaksiyon, uygun bir başlatıcı uyarıcı uygulanmadıkça gerçekleşmemelidir.
3. Reaksiyon şiddetli olmalı, madde tamamen veya neredeyse tamamen gaz ürünlere dönüşmelidir.
4. Reaksiyon ekzotermik olmalıdır.
5. Reaksiyon, harici bir oksijen kaynağına veya enerjiye (örneğin, ısı) ihtiyaç duymadan, yalnızca başlatma için gerekli olan enerji dışında, kendi kendine sürdürülebilir olmalıdır.

Bu koşullar, kimyasal patlayıcı maddelerin tanımlanması ve sınıflandırılmasında önemli bir temel oluşturmaktadır. Ancak patlayıcı maddeler yalnızca kimyasal patlayıcılarla sınırlı olmayıp, aynı zamanda nükleer patlayıcıları da kapsamaktadır. Bu doğrultuda, Weinheimer (2002) tarafından belirtilen bu koşullar yalnızca kimyasal patlayıcılar için geçerli olup, nükleer patlayıcıları kapsamamaktadır. Dolayısıyla sadece kimyasal patlayıcıları kapsayan bu koşullar, patlayıcı maddelerin tüm çeşitlerini açıklamak için yetersiz kalmaktadır. Bu eksiklik, patlayıcı maddelerin sınıflandırılmasında daha geniş ve kapsayıcı bir perspektifin benimsenmesi gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Öte yandan, patlayıcı maddelerin kimyasal yapılarına ve patlayıcı özelliklerine odaklanılarak yapılan bir sınıflandırmada, tüm patlayıcı maddeler aşağıda belirtilen sekiz ana grupta toplanmaktadır:

1. $-NO_2$ ve $-ONO_2$ hem organik hem de inorganik bileşiklerde,
2. –N = N– ve –N = N = N– inorganik ve organik azitlerde,
3. $-NX_2$, örneğin NCl_3 (X- bir halojen)
4. –N = C, fülminatlarda,
5. $-OClO_2$ ve $-OClO_3$, sırasıyla inorganik ve organik kloratlar ve perkloratlarda,
6. –O – O – ve –O – O – O –, sırasıyla inorganik ve organik peroksitler ve ozonitlerde,
7. –C ≡ C–, asetilen ve metal asetilenlerde,
8. M – C, metal ile C bağlı bazı organometalik bileşiklerde. (Urbanski, 1964)

Bu sınıflandırmada, bir molekülün patlayıcı özellikleri ile yapısı arasındaki ilişkiye yönelik geliştirilen sistematik

bir yaklaşım yönteminden farklı olarak, Akhavan (2004) patlayıcı maddeleri kimyasal yapıları, performans özellikleri ve kullanım alanları temelinde ele alarak sınıflandırmış ve bu doğrultuda iki ana gruba ayırmıştır: Kimyasal patlayıcılar ve patlayıcı amaçlı kullanılmayan ticari kimyasallar. Kimyasal patlayıcılar ise üç alt grupta incelenmiştir: Birincil patlayıcılar, ikincil patlayıcılar ve itici güç yakıtları. Bununla birlikte, ikincil patlayıcılar askerî ve ticari patlayıcılar olarak; itici güç yakıtları ise silâh ve roket iticiler olarak alt kategorilere ayrılmıştır (Akhavan, 2004).

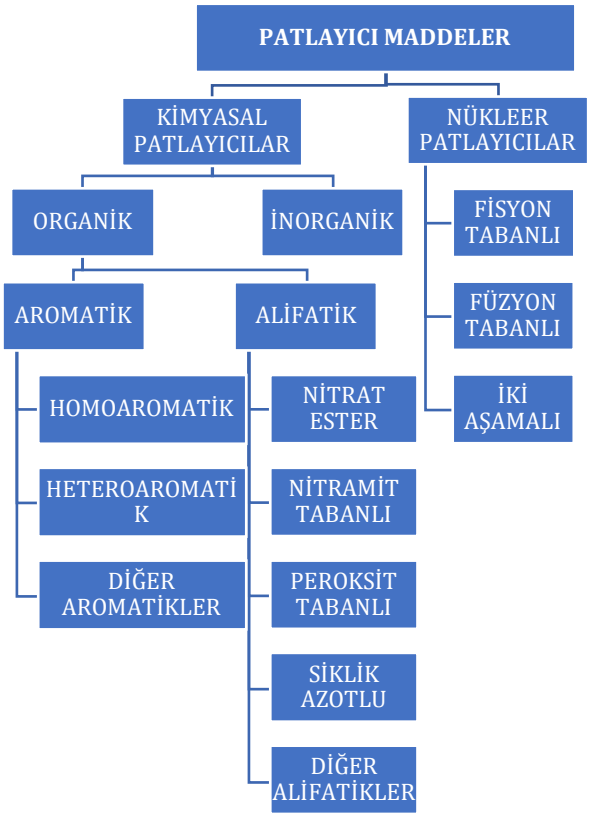
Patlayıcı maddelerin kimyasal özellikleri, kullanım amaçları, güçleri ve üretim şekilleri temel alınarak bir sınıflandırma gerçekleştiren Öz ve Atakol (2020) ise, bu maddeleri ayrıntılı bir biçimde incelemiş ve kapsamlı bir şekilde şu başlıklar altında sınıflandırmıştır:

1. Kimyasal özelliklerine göre
   - Azotürler ve Fulminatlar
   - Nitrolu patlayıcılar
   - Nitratlı patlayıcılar
   - Kloratlı patlayıcılar
   - Perkloratlı patlayıcılar
   - Dinamitler
   - Kara barutlar ve benzeri karışımlar
2. Kullanım amaçlarına göre
   - Tahrip edici patlayıcılar
   - Ateşlemeye yarayan patlayıcılar(detonatörler)
   - Askerî patlayıcılar
   - Fırlatıcı yakıt olarak kullanılan patlayıcılar (propellantlar)
   - Diğer patlayıcılar
3. Güçlerine göre
   - Alçak patlayıcılar
   - Yüksek patlayıcılar
4. Üretim şekillerine göre
   - Fabrikasyon patlayıcılar
   - El yapımı patlayıcılar

Yukarıda bahsedilen bu sınıflandırmalardan farklı bir yaklaşım benimseyen Cooper (1996), patlayıcı maddeleri, kimyasal yapılarına ve moleküler düzeydeki davranışlarına odaklanarak değerlendirmiş ve bu doğrultuda iki ana gruba ayırmıştır: Organik ve inorganik patlayıcılar. Cooper (1996), organik patlayıcı maddeleri de kendi içinde aromatik ve alifatik olarak iki alt grupta sınıflandırmıştır. Benzer şekilde, kimyasal yapıya odaklanan bir diğer çalışmada Türker ve Variş (2009), Cooper (1996)'ın yaptığı sınıflama ile büyük ölçüde örtüşen bir yaklaşım sergileyerek patlayıcı maddeleri benzer kategorilerde ele almıştır. Ancak her iki sınıflandırmada da dikkat çeken önemli bir eksiklik, nükleer patlayıcı maddelere yer verilmemesidir. Bu durum, söz konusu sınıflandırmaların yalnızca kimyasal patlayıcı maddelere yönelik bir çerçeve sunduğunu açıkça ortaya koymakta ve bu sınıflandırmaların, patlayıcı maddelerin genel sınıflandırmasından ziyade kimyasal patlayıcı maddelere özgü sınıflandırmalar olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Ayrıca, yukarıda bahsedilen literatürdeki başlıca sınıflandırmaların da nükleer patlayıcıları içermemesi, patlayıcı madde sınıflandırmaları açısından önemli bir eksiklik teşkil etmektedir. Nükleer patlayıcılar, bileşimleri, fiziksel ve kimyasal özellikleri, etkileri ve sınıflandırılma kriterleri açısından kimyasal patlayıcı maddelerden belirgin şekilde farklılık göstermektedir. Bu nedenle, patlayıcı maddelere ilişkin bütüncül bir sınıflandırmanın hem kimyasal hem de nükleer patlayıcıları kapsayacak şekilde geliştirilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, yalnızca kimyasal patlayıcıları içeren bir sınıflandırma, patlayıcı maddelerin genel bir sınıflandırması olarak değerlendirilemeyeceği gibi, nükleer patlayıcıların patlayıcı madde olarak kabul edilmediği şeklinde yanlış bir algıya yol açabilir. Bunun yanı sıra, patlayıcı maddelerin kullanım alanları, etkileri ve potansiyel tehlikeleri hakkında eksik bir anlayış, bu maddelerin operasyonel süreçlerine yönelik etkili yaklaşımlar geliştirilmesini engelleyebilir. Dolayısıyla, kapsamlı ve bütüncül bir sınıflandırma, patlayıcı maddelerle ilgili akademik çalışmalara ve uygulamalara önemli katkılar sağlayabilir. Patlayıcı maddeler, mevcut sınıflandırmalardan farklı olarak, yapısal ve kimyasal özellikleri, moleküler ve atomik düzeydeki nitelikleri, reaksiyon türleri ve patlama şekilleri gibi kriterler temel alınarak Şekil 1'de gösterildiği üzere daha bütüncül bir yaklaşımla sınıflandırılabilir.

Bu sınıflandırmada, patlayıcı maddeler kimyasal ve nükleer patlayıcılar olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Kimyasal patlayıcılar, dışarıdan reaksiyon aktivasyon enerjisini en az karşılayacak büyüklükteki fiziksel bir etkiyle ani bir şekilde ekzotermik reaksiyon göstererek enerjisini ısı, ışık, ses, şok ve gaz gibi değişik formlarda açığa çıkaran kimyasal bileşikler ya da karışımlardır. Bu grup patlayıcı maddeler, yüksek enerjili tepkimeleri gerçekleştirme kapasitesi ve etkin sonuçlar sağlama potansiyeli nedeniyle özellikle askerî uygulamalar başta olmak üzere madencilik faaliyetleri ve endüstriyel projelerde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Kimyasal patlayıcı maddeler, Şekil 1'de de belirtildiği üzere; organik ve inorganik patlayıcılar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır.



Şekil 1. Patlayıcı maddeler sınıflandırması.

Organik patlayıcılar, yapılarında karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O) ve azot (N) gibi atomlar bulunduran ve patlayıcı özellik gösteren kimyasal bileşiklerdir. Patlayıcı maddelerin büyük bir çoğunluğu, organik patlayıcılar sınıfında yer almaktadır (Altgilbers vd., 2011). Organik patlayıcılar, aromatik ve alifatik patlayıcılar olmak üzere iki alt grupta sınıflandırılmaktadır.

Aromatik patlayıcılar, yapısında π elektronlarının delokalizasyonuna sahip, Hückel Kuralı'na (4n+2 π elektronu) uyan ve halkalı bir yapı içeren, genellikle benzen veya türevleri temelinde oluşturulmuş organik patlayıcılardır. Bu tür patlayıcılar, homoaromatik, heteroaromatik ve diğer aromatik patlayıcılar olarak üç alt grupta incelenmektedir. Homoaromatik patlayıcılar, aromatik halkaların yalnızca karbon (C) atomlarından oluşan patlayıcı türleridir. Bu gruptaki örnekler arasında 2,4,6-trinitrotoluen (TNT), tetril ve pikrik asit (TNP) gibi patlayıcı maddeler yer almaktadır. Heteroaromatik patlayıcılar, aromatik halkada bir veya daha fazla heteroatom içeren organik patlayıcı türleridir ve bunlara örnek olarak 4,4'-dinitro-3.3'-diazenofuroksan (DDF) verilebilir. Diğer aromatik patlayıcılar, klasik aromatiklik kriterlerine uymayan ancak yine de π elektronlarının delokalize elektron sistemleriyle aromatiklik gösteren organik patlayıcılardır; kurşun stifnat bu gruba örnek gösterilebilir.

Alifatik patlayıcılar, yapılarında π elektronlarının delokalizasyonu bulunmayan, açık zincirli (düz veya dallanmış) ya da aromatik olmayan halkalı yapıya sahip, genellikle oksijence zengin ve enerjik gruplar içeren organik patlayıcılardır. Bu grup patlayıcılar, seri üretilen ilk modern patlayıcılardır (Cooper ve Kurowski, 1996). Alifatik patlayıcılar, nitrat ester, nitramit tabanlı, peroksit tabanlı, siklik azotlu alifatik ve diğer alifatik patlayıcılar olmak üzere beş alt gruba ayrılmaktadır. Alifatik nitrat ester patlayıcılar, yapısında π elektronlarının delokalizasyonu olmayan, açık zincirli (düz veya dallanmış) olan, bünyesinde nitrat ester ($-ONO_2$) grubu bulunduran ve patlayıcı özellik gösteren organik bileşiklerdir. Bu tür patlayıcılara nitrogliserin (NG), metil nitrat gibi patlayıcılar örnek verilebilir. Alifatik nitramit tabanlı patlayıcılar ise; yapısında π elektronlarının delokalizasyonu olmayan, açık zincirli (düz veya dallanmış) olan, bünyesinde nitramit grubu ($-NO_2$) bulunduran ve patlayıcı özellik gösteren organik bileşiklerdir. Etilendinitramin (EDNA) ve nitroguanidin (NQ) bu tür patlayıcılara örnek olarak verilebilir. Alifatik peroksit tabanlı patlayıcılar, yapısında π elektronlarının delokalizasyonu olmayan, açık zincirli (düz veya dallanmış) olan, bünyesinde peroksit grubu (-O-O-) bulunduran ve patlayıcı özellik gösteren organik bileşiklerdir; örnek olarak aseton peroksit (AP ya da TATP) ve metil etil keton peroksit verilebilir. Siklik azotlu alifatik patlayıcılar, aromatik olmayan siklik yapıya sahip olmakla beraber yapısında π elektronlarının delokalizasyonu olmayan, azot içeren ve genellikle oksijen açısından zengin, enerjik gruplar bulunduran, aromatik patlayıcılara kıyasla daha düşük kararlılığa sahip ve patlayıcı özellik gösteren organik bileşiklerdir. Siklotrimetilentrinitramin (RDX) ve siklotetrametilen tetranitramin (HMX) bu gruba örnek gösterilebilir. Diğer alifatik patlayıcılar ise, ilk dört gruptaki alifatiklik kriterlerine uymayan ancak yine de alifatik özellik gösteren ve patlayıcı özelliklere sahip organik bileşikler olarak tanımlanmaktadır. Bu tür patlayıcılara triazidometan ve üre nitrat örnek gösterilebilir.

Kimyasal patlayıcı türlerinden inorganik patlayıcılar, bünyesinde özellikle karbon (C) ve hidrojen (H) atomlarını aynı anda bulundurmayan, metal ve ametal atomları arasında iyonik bağlar tesis etmiş ve/veya metallerin oksitleri, nitratları, kloratları, peroksitleri, sülfatları veya diğer inorganik tuz bileşenlerinden meydana gelen kimyasal patlayıcılardır. İnorganik patlayıcılara örnek olarak kurşun azotür ve gümüş azotür verilebilir.

Patlayıcı maddeler sınıflandırmasının ana gruplarından biri olan nükleer patlayıcılar ise, atom çekirdeklerinin yüksek sıcaklık, yüksek basınç veya nötron bombardımanı gibi dış etkenler sonucunda, kontrolsüz bir hızda gerçekleşen fisyon (çekirdek parçalanması) veya füzyon (çekirdek birleşmesi) reaksiyonları ile büyük miktarda enerji açığa çıkaran maddeler olarak tanımlanmaktadır. Çok ağır atom çekirdekleri ile çok hafif atom çekirdekleri düşük bağlanma enerjilerine sahip olduklarından ağır bir çekirdek parçalandığında (fisyon) enerji salacağı ve iki hafif çekirdek birleştiğinde (füzyon) de enerji salacağı anlamına gelmektedir (Siracusa, 2008). Bu süreçte, enerjiye ek olarak radyasyon (özellikle gama ışınları), yüksek sıcaklık,

yüksek basınç, serbest nötronlar ve yoğun elektromanyetik dalgalar gibi unsurlar da üretilmektedir. Nükleer patlayıcılar denildiğinde genellikle ilk akla Hiroşima ve Nagazaki'ye atılan atom bombaları gelse de, başta ABD, Çin, Rusya, Fransa ve İngiltere gibi ülkeler tarafından gerçekleştirilen, ancak nispeten daha az gündeme gelen nükleer denemeler de bu kapsamda örnek gösterilebilir. Bu tür patlayıcı maddeler, Şekil 1'de de belirtildiği üzere; fisyon tabanlı, füzyon tabanlı ve iki aşamalı nükleer patlayıcılar olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır.

Fisyon tabanlı nükleer patlayıcılar, ağır atom çekirdeklerinin nötron bombardımanı sonucunda zincirleme bir şekilde parçalanarak daha hafif atom çekirdeklerine bölünmesiyle büyük miktarda enerji, radyasyon (özellikle gama ışınları), nötronlar, radyoaktif maddeler ve izotoplar ile yüksek sıcaklık ve basınç gibi unsurlar açığa çıkaran maddelerdir. Bu tür nükleer patlayıcılara demir-56'dan büyük olan ağır atom çekirdeklerinden uranyum-235 ve plütonyum-239'un çekirdek bölünmesi örnek verilebilir. Fisyon tabanlı patlayıcılar, füzyon tabanlı ve iki aşamalı nükleer patlayıcılara kıyasla daha az karmaşık bir yapıya sahip olup, atom çekirdeklerinin parçalanması yoluyla enerji üretirken daha basit tasarım ve teknik gereksinimlere ihtiyaç duydukları için genellikle geliştirilmesi ve üretilmesi diğerlerine nazaran daha kolay olarak değerlendirilmektedir.

Füzyon tabanlı nükleer patlayıcılar, hafif atom çekirdeklerinin yüksek sıcaklık ve basınç altında birleşerek daha ağır çekirdekler oluşturması sonucu büyük miktarda enerji, radyasyon, yüksek sıcaklık ve basınç, serbest nötronlar ve yoğun elektromanyetik dalgalar gibi patlama ürünlerinin açığa çıkmasına neden olan maddelerdir. Bu tür nükleer patlayıcılara demir-56'dan küçük olan hafif atom çekirdeklerinden döteryum ve trityum'un birleşmesi örnek verilebilir. Füzyon tabanlı nükleer patlayıcıların performansı, fisyon tabanlı nükleer patlayıcılara kıyasla daha güçlüdür. Ancak fisyon aşamasına ihtiyaç duymayan saf bir füzyon tabanlı patlayıcının teorik olarak geliştirilmesi mümkün olmasına rağmen bugüne kadar geliştirilmemiştir (Agrawal, 2010).

İki aşamalı nükleer patlayıcılar ise, fisyon patlaması sonucu açığa çıkan enerjinin, füzyon patlamasını tetiklemek için ihtiyaç duyulan enerjiyi sağlamasının ardından, büyük miktarda enerji, radyasyon (özellikle gama ışınları), serbest nötronlar, radyoaktif maddeler ve izotoplar ile yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve yoğun elektromanyetik dalgalar gibi unsurların ortaya çıkmasına neden olan maddelerdir. Ancak patlama enerjisinin çoğu, füzyon reaksiyonlarından elde edilir (Swahn, 1992). Bu tür patlayıcılara, hidrojen bombası örnek verilebilir.

3. Günümüz Uygulamaları ve Geleceği

3.1. Günümüz Uygulamaları

Patlayıcı maddeler, tarihi süreç içerisinde bilimsel ilerlemeler ve teknolojik gelişmelerle birlikte toplumsal ve kültürel değişimlere de bağlı olarak farklı kullanım alanlarında önemli roller üstlenmiştir. İlk keşfedildikleri dönemlerde genellikle sınırlı bir şekilde, askerî ya da kültürel amaçlarla kullanılan bu maddeler, modern patlayıcıların geliştirilmesiyle birlikte devletlerin ve toplumların ihtiyaçlarına göre çeşitlenerek kullanım alanları yelpazesi genişlemiştir.

Günümüzde patlayıcı maddeler, yalnızca savaşlarda üstünlük sağlamak, toprak kazanmak veya savunma yapmak gibi askerî hedeflerin gerçekleştirilmesinde ya da kültürel ritüellerde kullanılmakla kalmayıp, aynı zamanda endüstriyel faaliyetlerden bilimsel araştırmalara, madencilik sektöründen sağlık sektörüne, arama ve kurtarma operasyonlarından yangın söndürme faaliyetlerine, enerji üretiminden uzay ve havacılık sektörüne, petrol ve doğal gaz sektöründen eğlence sektörüne kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu geniş kullanım yelpazesi ve uygulama çeşitliliği Tablo 1'de detaylandırılmıştır.

Patlayıcı maddelerin böylesine geniş bir yelpazede kullanımı, bu maddelerin benzersiz enerji salınımı ve bu enerjinin farklı amaçlara yönelik hassas bir şekilde kontrol edilebilmesine ve yönlendirilebilmesine imkân tanıyan özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu özellikleri sayesinde patlayıcılar, söz konusu alanlardaki ihtiyaçların karşılanmasında önemli rol oynayarak modern dünyanın şekillenmesinde ve insan yaşamının pek çok yönünün kolaylaştırılmasında etkili bir unsur haline gelmiştir. Ayrıca, patlayıcı maddelerin doğru ve güvenli şekilde kullanılması, hem ekonomik kalkınma hem de toplumsal güvenliğin sağlanması açısından büyük bir önem taşımaktadır.

Öte yandan, yüksek enerjili kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan hızlı gaz salınımı, basınç artışı, sıcaklık yükselmesi ve şok dalgaları, patlayıcı maddelerin etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayan temel faktörlerdir. Bu fiziksel süreçler, patlayıcı maddelerin askerî, endüstriyel ve diğer çeşitli uygulamalarda güçlü bir enerji kaynağı olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır. Patlama sırasında meydana gelen hacimsel genişleme, çevrede yüksek basınç oluştururken bu basıncın hızla yayılması şok dalgalarını tetiklemekte ve şok dalgaları ile sıcaklık artışının birleşik etkisi, çevredeki malzemelerin kırılmasına, parçalanmasına veya şekil değiştirmesine yol açmaktadır. Bu özellikler, patlayıcı maddelerin özellikle enerji aktarımı ve malzeme işleme gerektiren çeşitli uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Patlayıcı maddelerin enerjisi hem hassas hem de yıkıcı görevlerde kullanılacak şekilde yönlendirilebildiğinden minimum risk ve optimum verimlilikle hedeflenen sonuçlara ulaşılabilmesini mümkün kılmaktadır.

Öte yandan, nükleer patlayıcı kullanımının çevre, sağlık ve güvenlik açısından oluşturduğu riskler, özellikle İkinci

Dünya Savaşı'nın ardından uluslararası toplumun gündemine gelmiş olmasına rağmen, küresel veya bölgesel güç olma hedefi taşıyan bazı devletler, 21. yüzyılın başlarında bile nükleer test denemelerini sürdürmüşlerdir. Ancak "Nükleer Denemelerin Kapsamlı Yasaklanması Antlaşması'nın (The Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty, CTBT) 24 Eylül 1996 tarihinde tüm devletlerin imzasına açılması" (CTBTO, 1996) ile birlikte, son yıllarda nükleer test denemeleri gerçekleştirilmemiştir. Yine de, geçmişte nükleer silâhlanma yarışına giren bazı devletlerin bu antlaşmayı imzalamasına rağmen onaylamamaları, nükleer silâh denemelerinin sona erdiğini ve bu kullanım alanının tamamen ortadan kalktığını iddia etmeyi güçleştirmektedir. Bu bağlamda, Rusya'nın 2023 yılında CTBT Antlaşması'ndan çekilmesi, bu iddiayı güçlendirmektedir. Bu durum, söz konusu antlaşmayı onaylayan devletlerin dahi antlaşmadan çekilerek uluslararası baskılara rağmen, nükleer silâh geliştirme veya test denemeleri yapma olasılıklarının her zaman mevcut olduğunu göstermektedir. Nükleer silâhlarla ilgili bu tür stratejik adımlar, küresel güvenlik açısından ciddi bir tehdit oluşturmaya devam etmektedir.

Tablo 1. Patlayıcı maddelerin günümüzdeki kullanım alanları ve uygulama türleri*

Kullanım Alanı	Uygulama Türleri
Askerî	Klasik mühimmatlar, füzeler, roket ve nükleer silah sistemleri vs.
	Mayınların etkisiz hale getirilerek güvenli bölge oluşturulması
	Düşman hedeflerinin yok edilmesi, yeraltı ve yerüstü stratejik yapıların tahrip edilmesi vs.
	Askeri yeraltı üsleri ve savunma sığınaklarının inşası
Madencilik	Sismik aramalar, yeraltı kuyuları ve galerilerin açılması vs.
	Yeraltı madenciliğinde hazırlık, üretim ve tavan göçertme işlemleri vs.
	Taş ocaklarında ve açık maden sahalarında dekopaj işlemleri, basamak patlatmaları vs.
	Rezervuar ve yan kayaçların gevşetilmesi, kırılması, çatlatılması işlemleri vs.
İnşaat	Karayolu, demiryolu, metro, su ve kanalizasyon tünellerinin açılması
	Baraj ve gölet inşasında zeminin hazırlanması, su yolları için derivasyon tünelleri açılması vs.
	Yol ve köprü yapımında sert zemin katmalarının kırılması, köprü temelleri ve ayaklarının inşası
	Binaların ve beton yapıların temel kazıları sırasında kayaçların kırılması vs.
	Yapıların kontrollü ve güvenli bir şekilde yıkımı
Uzay ve Havacılık	Roket fırlatmalarında ve uzay aracı itiş sistemlerinde
	Füze sistemleri ile uyduların imhası
Enerji	Nükleer santrallerde radyoaktif ağır atom çekirdeklerinin kontrollü olarak fisyon reaksiyonu gerçekleştirmesiyle elektrik üretiminde
Petrol ve Doğal Gaz	Petrol ve gaz sondajları sırasında yeraltı yapılarının tespit edilmesi, sismik aramalar vs.
	Petrol ve gaz sondajları sırasında yeraltındaki kayaçların kırılması ve sondaj yapılmasında
	Rezervuar açma ve gaz çıkarma işlemleri için kaya çatlatma tekniklerinde
	Yeraltı depolama alanlarında
	Yeni petrol boru hatları döşenmeden önce hattın açılması için patlatma işlemlerinde
	Petrol kuyularındaki yangının söndürülmesinde
Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar	Enerji yoğunluğu yüksek testler ve deneylerde
	Yeni malzeme türlerinin şok ve dayanıklılık testlerinde
Sağlık	Tıbbi cihazlar ve ilaç tedavisinde mikro patlamalarla kontrollü salınım yapılması vs.
	Böbrek taşlarının mikro patlayıcılarla kırılmasında (litotripsi), kalp damarlarında yapılan mikro cerrahi operasyonlarında vs.
Tarım ve Ormancılık	Orman yangınlarını söndürmek için yangın hatları açmak ve kontrol sağlamak amacıyla
	Orman ve tarım alanlarında ağaç köklerinin çıkarılması işlemlerinde
	Su geçirmez kayaçların çatlatılmasında
Arama ve Kurtarma	Tünel, maden, mağara gibi yerlerde büyük kaya parçalarının çökmesi veya düşmesi gibi durumlarda enkaz altındaki kişilere ulaşmak için patlatma operasyonlarında
	Derin su altı operasyonlarında, batık nesneleri bulma, kurtarma ve çıkartma çalışmalarında
Eğlence ve Gösteri	Kutlamalar, festivaller ve gösterilerde
	Sinema ve sahne gösterilerinde özel efektler oluşturmada

*Bu tablo, Ateşeceloğlu (2011) ve Agrawal (2010) tarafından sunulan bilgiler ışığında tarafımızca hazırlanmıştır.

Günümüzde, nükleer patlayıcıların çevre, sağlık ve güvenlik açısından risklerini en aza indirmek için uluslararası düzeyde çeşitli tedbirler alınmaya çalışılırken, ilerleyen bilim ve gelişen teknolojiyle daha spesifik ve verimli patlayıcıların geliştirilmesi hedeflenmektedir. Kontrolsüz kullanıldıklarında büyük tahribatlara ve felaketlere yol açmalarına karşın, kontrollü bir şekilde kullanıldıklarında birçok uygulama alanında önemli faydalar sağladıkları tartışmasız bir gerçektir. Patlayıcı maddelerin daha güvenli, verimli ve çevreye daha duyarlı bir şekilde kullanılmasına yönelik araştırmalar ve çalışmalar günümüzde de sürdürülmektedir.

3.2. Geleceğe Yönelik Eğilimler ve Sürdürülebilir Yaklaşımlar

Geçmişte olduğu gibi günümüzde de patlayıcı maddeler, teknolojik ve bilimsel araştırmalardaki ilerlemelere paralel olarak üretim, kullanım ve güvenlik alanlarında sürekli bir evrim sürecinden geçmektedir. Yaşanan bu gelişim, yenilikçi formülasyonlar, ileri mühendislik uygulamaları ve dijital teknolojilerin sunduğu imkânlarla her geçen gün daha sofistike bir hale gelmektedir.

Nitekim günümüzde, yüksek termal kararlılığa sahip ve darbe ya da sürtünmeye karşı düşük hassasiyet gösteren patlayıcılar öncelikli olarak tercih edildiğinden patlayıcı teknolojilerindeki araştırmalar da özel uygulamalara yönelik patlayıcıların tasarımı ve sentezine odaklanmıştır (Agrawal ve Hodgson, 2007). Bilimsel ve teknolojik ilerlemelerin ivme kazanmasıyla birlikte, bu alandaki çalışmaların gelecekte daha hızlı ve etkili bir şekilde devam etmesi öngörülmektedir.

Patlayıcı maddelerin geleceği, daha güvenli, çevre dostu ve kontrollü kullanım üzerine odaklanmaktadır. Güvenlik, çevresel sürdürülebilirlik ve hassas kullanım alanlarında kaydedilecek yenilikler, patlayıcı madde teknolojilerinin gelecekteki evriminde kilit rol oynayacak unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Özellikle nanoteknoloji, biyoteknoloji, yenilikçi malzeme bilimi, yapay zekâ ve bilgisayar destekli modelleme gibi alanlardaki gelişmelerin, patlayıcı maddelerin geleceği üzerinde önemli bir etki yaratması beklenmektedir. Bu yenilikler, sadece mevcut patlayıcı maddelerin performansını artırmakla kalmayıp, yeni nesil malzemeler ve teknolojilerle patlayıcı maddeler ve sistemlerinde köklü değişikliklere yol açma potansiyeline sahiptir. Nanoteknoloji ve yeni nesil malzemeler, patlayıcı maddelerin bileşiminde köklü değişiklikler yaparak güç, stabilite ve güvenlik gibi kritik özelliklerin optimize edilmesine olanak tanıyacağından gelecekte hem askerî hem de endüstriyel amaçlarla kullanılan patlayıcıların üretiminde bu tür ileri malzemelerin yaygın olarak tercih edilmesi beklenmektedir. Bu tür malzemelerin kullanımı, patlayıcıların mikroskobik boyutta tasarlanmasına ve hedefler üzerinde daha hassas patlamalar gerçekleştirilmesine olanak tanıyacağından güvenlik risklerinin minimize edilme potansiyeli de taşımaktadır. Bu avantajlar, patlayıcı maddelerin daha verimli ve kontrollü bir enerji salınımı gerçekleştirerek patlamaların gücünü artırmanın yanı sıra, yanıcı özelliklerinin azaltılmasına ve daha hassas bir patlama kontrolünün sağlanmasına imkân tanıyarak çevresel etkilerin minimize edilmesini ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkı sağlaması da beklenmektedir.

Patlayıcı maddelerin tasarımından kullanımına kadar ki süreçlerin her aşamasında yapay zekâ, yenilikçi çözümler sunma potansiyeline sahiptir. Bu durum, patlayıcı maddelerin her aşamasının izlenmesini ve olası tehlikelerin önceden tespit edilerek çözüm üretilmesini ve hatta yapay zekâ destekli algoritmalar yardımıyla taşınma ve depolanma süreçlerindeki muhtemel risklerin de minimize edilmesini sağlayabilir. Dolayısıyla, yapay zekâ, gelecekte patlayıcı maddeler konusunda köklü değişimlere ve devrim niteliğinde yeniliklere de zemin hazırlayabilir.

Öte yandan nükleer patlayıcılar, her ne kadar devletler açısından savaşları önlemede caydırıcı bir araç olarak görülse de çevre, sağlık ve güvenlik açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu tehditlerle mücadele etmek ve küresel barışı tesis etmek amacıyla CTBT antlaşması, uluslararası toplum için kritik bir adım olarak değerlendirilmektedir. Ancak, geçmişte Marshall Adaları'nda nükleer testler gerçekleştiren ABD ile Doğu Türkistan'da "16 Ekim 1964 – 29 Temmuz 1996 tarihleri arasında 44 nükleer silâh denemesi" (Aslan ve Işık, 2024) yaptığı bilinen Çin'in yanı sıra, Kuzey Kore ve İsrail gibi ülkelerin bu antlaşmayı henüz onaylamamış olmaları geleceğe yönelik ciddi belirsizlikler yaratmaktadır. Dahası, Rusya'nın 2023'te kendi isteğiyle antlaşmadan çekilmesi, bu belirsizliği daha da derinleştirmektedir. Özellikle, nükleer silâh sahibi ülkelerin uluslararası düzeyde siyasi ve stratejik çıkarlarını korumak için bu tür anlaşmalardan uzak durmayı tercih etmeleri, uluslararası iş birliğini zayıflatarak silâhlanma yarışını yeniden tetikleme riskini artırmaktadır.

Gelecekte, nükleer patlayıcı geliştiren ülkelerin bu patlayıcıları deneme ve olası bir savaşta kullanma ihtimali olduğundan büyük kitleler ve ekosistem üzerinde ciddi bir tehdit oluşturmaya devam edecektir. Ve hatta bilimsel ve teknolojik ilerlemelerle mevcut nükleer patlayıcıların yıkıcı performansının çok daha ötesine geçen yeni modellerin üretilmesi de ihtimal dâhilindedir. Gelecekte nükleer patlayıcıların daha yıkıcı bir şekilde evrilme ihtimali karşısında kimyasal patlayıcıların gelişiminde çevresel sürdürülebilirlik önemli bir yönelim olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde kullanılan patlayıcıların üretimi ve kullanımı çevresel kirlilik ve toksik atık sorunlarına yol açmasının yanı sıra doğal kaynakların kirlenmesine ve ekosistem dengesinin de bozulmasına etkileri olduğundan çevre dostu patlayıcıların geliştirilmesi zaruret haline gelmiştir. Bu sebeple, gelecekte hem askerî hem de endüstriyel amaçlı patlayıcı maddelerin geliştirilmesinde ve kullanımında çevresel etkilerin azaltılması ve daha sürdürülebilir süreçlerin benimsenmesine yönelik önemli bir eğilim beklenmektedir.

Özetle, patlayıcı maddelerin gelecekteki eğilimleri, kullanım alanları ve amaçlarına bağlı olarak, performanslarının artırılması, güvenlik risklerinin minimize edilmesi, çevresel etkilerinin azaltılması ve maliyetlerinin düşürülmesi gibi bir dizi faktörü göz önünde bulunduran bir yaklaşımla şekilleneceği tahmin edilmektedir. Bu doğrultuda, bilimsel ve teknolojik ilerlemelerle birlikte çevresel sürdürülebilirlik ve güvenlik anlayışından ödün vermeksizin, patlayıcı maddelerin daha verimli ve etkili bir şekilde üretilip kullanılmasına yönelik eğilimlerin öncelik kazanacağı düşünülmektedir.

4. Sonuç

Patlayıcı maddeler, tarihsel süreç boyunca gerek askerî gerekse sivil alanlarda kritik bir rol oynamış, günümüzde ise hem kullanım alanları hem de kontrol mekanizmaları açısından önemli bir dönüşüm yaşamaktadır. Bu çalışmada, patlayıcı maddelerin karmaşık doğasını ve modern dünyadaki çok yönlü rollerini anlamak için patlayıcı maddelerin sınıflandırılması, güncel uygulamaları ve geleceğe yönelik eğilimleri nitel bir yaklaşımla incelenmiş ve bu alandaki mevcut durum ile olası gelecek senaryoları detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Nitekim ulusal ve uluslararası literatür taraması neticesinde, üzerinde uzlaşılmış evrensel bir patlayıcı tanımının ve sınıflandırmasının bulunmayışının yanı sıra sınıflandırmaların genellikle kimyasal patlayıcı odaklı olması ve nükleer patlayıcıları yeterince kapsamadığı görülmüştür. Patlayıcı maddeler alanında önemli bir eksiklik olarak öne çıkan bu durum, patlayıcı maddelerin hem kimyasal hem de nükleer yönlerini bütüncül bir şekilde ele alan bir sınıflandırma sisteminin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla patlayıcı maddeleri daha geniş bir perspektiften ele alan kapsamlı ve daha anlaşılır bir sistematik yaklaşım önerilmiştir. Önerilen bu yaklaşımda, patlayıcı maddeler bağ yapıları göz önünde bulundurularak kimyasal ve nükleer patlayıcılar olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmış olup kimyasal patlayıcılar, yapılarındaki temel elementler, nükleer patlayıcılar ise atom çekirdeklerinin büyüklüğü dikkate alınarak alt sınıflara ayrılmıştır.

Bununla birlikte, patlayıcı maddelerin günümüzdeki kullanımı, bilimsel ilerlemeler ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda önemli bir evrim geçirerek askerî alanın yanı sıra sivil ve endüstriyel alanlarda da yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Patlayıcı maddeler, yalnızca yıkıcı potansiyellere sahip olmakla kalmayıp, aynı zamanda yapıcı işlevlerde de önemli roller üstlenmektedir. Ancak yüksek enerji salınımı kapasiteleri sayesinde ekonomik ve işlevsel çözümler sundukları halde, bu süreçlerin kimyasal ve nükleer atıklar ile çevresel emisyonlara yol açması önemli bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum, çevresel etkilerin minimize edilmesine yönelik bilimsel araştırmaların artırılmasını ve yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu alandaki günümüz araştırmaları, özellikle nanoteknoloji, yapay zekâ ve akıllı kontrol sistemleri gibi alanlardaki ilerlemelerle patlayıcı maddelerin daha hassas, kontrollü ve güvenli şekilde kullanılmasını sağlayacak yeni teknolojilerin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır.

Gelecekte, disiplinler arası yaklaşımların ve yenilikçi teknolojilerin patlayıcı maddelerin tasarımı, üretimi ve kullanımı üzerindeki etkisinin daha da belirginleşmesi öngörülmektedir. Özellikle mühendislik, malzeme bilimi, kimya ve bilgi teknolojilerindeki gelişmeler, hem askerî hem de sivil uygulamalarda daha güvenli, çevre dostu ve sürdürülebilir çözümler geliştirilmesine olanak tanıyacağı düşünülmektedir. Ayrıca biyoteknoloji ve nanoteknoloji gibi disiplinlerin bu alana entegrasyonu, daha kontrollü ve hedef odaklı enerji salınımları sağlayan yeni nesil patlayıcı maddelerin ortaya çıkmasını sağlayacak bir potansiyel taşımaktadır. Bu tür ilerlemeler, yalnızca mevcut zorlukların giderilmesini sağlamakla kalmayıp yeni nesil patlayıcı maddelerin geliştirilmesine, yeni kullanım alanlarının keşfedilmesine ve daha geniş bir perspektiften değerlendirilebilmesine olanak tanıyacaktır. Buna ek olarak, patlayıcı madde teknolojilerinin geleceği, performans, güvenlik ve çevresel sürdürülebilirlik arasında denge kurmayı hedefleyen bütüncül yaklaşımlar doğrultusunda şekillenebilir. Bu doğrultuda, patlayıcı maddelerle ilgili kamu kurumları, özel sektör ve akademik kuruluşlar arasında etkin iş birliklerinin kurulması, araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) çalışmalarına daha fazla kaynak ayrılması ve yenilikçi teknolojilerin benimsenmesi, bu alandaki bilimsel ilerlemeleri ve teknolojik gelişmeleri de beraberinde getirecektir. Patlayıcı maddeler, hem günümüzde hem de gelecekte farklı alanlardan gelen yaklaşımlar ve inovasyonlarla daha güvenli, verimli ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir düzeye ulaşma potansiyeline sahiptir.

Sonuç olarak; bu çalışma, patlayıcı maddelere dair mevcut bilgilerin kapsamlı bir analizini sunmanın yanı sıra, kimyasal ve nükleer patlayıcıları bir arada kapsayan yeni bir sınıflandırma yaklaşımı ortaya koyarak hem akademik literatüre hem de pratik uygulamalara önemli katkılar sunmaktadır. Patlayıcı maddelerin stratejik öneminin giderek arttığı bir dönemde, çevresel, sosyal ve ekonomik faktörleri gözeten sürdürülebilir teknolojilerin geliştirilmesi, gelecekteki bilimsel ve teknolojik yeniliklerin temelini oluşturacaktır. Bu doğrultuda, bu çalışmanın konuya dair daha ileri araştırmalara ve pratik uygulamalara rehberlik etmesi beklenmektedir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	S.A.	B.İ.
K	100	
T	100	
Y	100	
VTI	50	50
VAY	50	50
KT	50	50
YZ	50	50
KI	100	
GR	100	

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu makale, Doktora tezinden üretilmiştir.

Kaynaklar

Agrawal JP. 2010. High energy materials: propellants, explosives and pyrotechnics. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, pp: 464.

Agrawal JP, Hodgson RD, 2007. Organic chemistry of explosive. John Wiley & Sons, Chichester, England, pp: 383.

Akhavan J. 2004. The chemistry of explosives. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, pp: 179.

Altgilbers LL, Baird J, Freeman BL, Lynch CS, Shkuratov SI, 2011. Explosive pulsed power. Imperial College Press, Singapore, India, pp: 596.

Aslan C, Işık G. 2024. Çin'in Doğu Türkistan'da uyguladığı nükleer denemeler ve bunun dünya basınına yansımaları. URL: https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3860163 (accessed date: January 25, 2024).

Ateşeceloğlu S. 2011. Endüstriyel patlayıcı madde portföyü ve performansa dayalı seçim kriterleri. MSc thesis, Okan University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İstanbul, Türkiye, pp: 151.

Cooper PW. 1996. Explosives engineering. Wiley-VCH Inc., New York, USA, pp: 460.

Cooper PW, Kurowski SR, 1996. Introduction to the technology of explosives. Wiley-VCH Inc., New York, USA, pp: 224.

CTBTO. 1996. Comprehensive nuclear-test-ban treaty (CTBT) and text on the establishment of a preparatory commission for the comprehensive nuclear-test-ban treaty organization. URL: https://www.ctbto.org/sites/default/files/Documents/CTBT_English_withCover.pdf (accessed date: July 10, 2024).

ÇSGB. 2015. Yer altı ve yer üstü kömür ocakları ile yer altında faaliyet gösteren diğer maden ocaklarında çalışma koşullarının iyileştirilmesi programlı teftiş sonuç raporu. URL: https://www.csgb.gov.tr/rtb/yayinlar/ (accessed date: April 5, 2023).

Dursun H. 2007. Determination of the postexplosion residues of nitro group containing explosives in soil with gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-termal energy analyser. MSc thesis, Middle East Technical University, Institute of Science, Ankara, Türkiye, pp: 71.

EGM. 2023. Sivil kullanım amaçlı patlayıcı maddeler. URL: https://www.egm.gov.tr/kurumlar/egm.gov.tr/IcSite/ozelguvenlik/SIVIL-KULLANIM-AMACLI-PATLAYICI-MADDELER-KITABI.pdf (accessed date: February 18, 2024).

Klapötke TM. 2017. Chemistry of high-energy materials. De Gruyter, Boston, Germany, pp: 385.

Meyer R, Köhler J, Homburg A. 2007. Explosives. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, pp: 421.

OSHA. 2017. Process safety management for explosives and pyrotechnics manufacturing. URL: https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA3912.pdf (accessed date: November 25, 2024).

Öz S, Atakol O. 2020. Bazı patlayıcı maddelerin termal analiz yöntemleriyle incelenmesi. İKSAD Publishing House, Ankara, Türkiye, pp: 154.

Özcan A. 1992. Âteş-i rûmî. In: Kollektif, editors. Türkiye Diyanet Vakfı İslam Ansiklopedisi. Türkiye Diyanet Vakfı Vakıf Yayınları, İstanbul, Türkiye, 4, pp: 559.

Siracusa JM. 2008. Nuclear weapons: a very short introduction. Oxford University Press, New York, USA, pp: 143.

Swahn J. 1992. The long-term nuclear explosives predicament: the final disposal of militarily usable fissile material in nuclear waste from nuclear power and from the elimination of nuclear weapons. PhD thesis, Chalmers University of Technology, Technical Peace Research Group, Göteborg, Sweden, pp: 250.

Thucydides. 1898. Thucydidis historiae. Hude C, editors. Aedibus B G Teubneri, Leipzig, Germany, pp: 352.

Türker L. Variş S, 2009. A review of polycyclic aromatic energetic materials. URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10406630903135971 (accessed date: April 16, 2023).

Urbanski T. 1964. Chemistry and technology of explosives. Pergamon Press, New York, USA, pp: 635.

Vasiliev AA. 1943. Bizans İmparatorluğu tarihi (Mansel AM, trans.). Maarif Matbaası, İstanbul, Türkiye, pp: 540.

Weinheimer R. 2002. Properties of selected high explosives. URL: https://www.academia.edu/34451320/Properties_of_Selected_High_Explosives (accessed date: January 18, 2024).