IMASCON 2025 AUTUMN

NOV 28-29, 2025 KOCAELİ / TÜRKİYE

15. INTERNATIONAL MARMARA SCIENCES CONGRESS

SCIENCES PROCEEDINGS BOOK



IMASCONGRESS

WWW.IMASCON.COM

IMASCON 2025 AUTUMN

INTERNATIONAL MARMARA SOCIAL SCIENCES CONGRESS

SCIENCES PROCEEDINGS BOOK

NOV 28-29, 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ ANITPARK KAMPÜSÜ

KOCAELİ / TÜRKİYE

www.imascon.com

info@imascon.com

ISBN:

EDITORS

- Prof. Dr. Arif Özkan, Kocaeli University
- Assoc. Prof. Dr. Serdar Biroğul, Düzce University
- Assoc. Prof. Dr. Ömer Güngör, Kocaeli University
- Lecturer Dr. Mustafa Of, Kocaeli University
- Lecturer İsmail Kılıçaslan, Kocaeli University
- Lecturer Kazım Kahraman, Kocaeli University
- Dr. Çağatay Taşdemirci, Anglia Ruskin University

All Rights Reserved
All Responsibilities of The Articles Belong to The Authors

SUPPORTERS


KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
1992
Polytechnic University of Coimbra
KOCAELİ
BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ
KÖRFEZ BELEDİYESİ
KARTEPE BELEDİYESİ
2009
GÖLCÜK
BELEDİYESİ
1923
İZMİT
BELEDİYESİ

Dear participants,

IMASCON 2025 AUTUMN Congress is an internationally recognized academic event. With this congress, where face-to-face and remote participation is supported, you will have the opportunity to present your scientific publications. Our congress, which is attended by respected names in the scientific community, is a candidate congress to bring new horizons to science.

From 9 countries 227 participants applied to the congress. Participants presented their papers for two days in the congress.

We are also grateful to the esteemed participants, our keynote speakers, our referees for their support and contributions to the success of this congress. Thank you for attending our academic event and supporting us.

The IMASCON congress will be held every year by raising its target higher. It will reach out to wider communities and increase the number of papers and participants.

Any kind of feedback about the congress is very important to us. You can reach our congress from our web page, info@imascon.com e-mail address and official social media accounts.

IMASCON ORGANIZING COMMITTEE 21.12.2025

KEYNOTE SPEAKERS











SCIENCE COMMITTEE

Listed in alphabetical order

- Prof. Dr. Ahmet Küçük, Kocaeli University
- Prof. Dr. Ahmet Duran Şahin, İstanbul Teknik University
- Prof. Dr. Alaeddin Bobat, Kocaeli University
- Prof. Dr. Arif Özkan, Kocaeli University
- Prof. Dr. Ayşe GÜNSEL, Kocaeli University
- Prof. Dr. Engin Özdemir, Kocaeli University
- Prof. Dr. Fatma Çanka Kılıç, Kocaeli University
- Prof. Dr. C. Gazi Uçkun, Kocaeli University
- Prof. Dr. Halil Atmaca, Artro Klinik
- Prof. Dr. Hanefi Bayraktar, Atatürk University
- Prof. Dr. Hasan Latif, Kocaeli University
- Prof. Dr. Hristo Ivanov Katrandzhiev, Marketing and Strategic Planning, University of National and World Economy, Bulgaria
- Prof.Dr. Hüseyin Dikme, İstanbul Gelişim University
- Prof. Dr. Hysen Mankolli, Editor of IJEES, Health and Environment Association, U.S.A.
- Prof. Dr. İlyas Uygur, Düzce University
- Prof. Dr. Juan Carlos, ROCA UNIVERSITY OF HUELVA, İspanya
- Prof. Dr. Kadri Süleyman Yiğit, Kocaeli University
- Prof. Dr. Luis M. F. Roseiro, ISEC
- Prof. Dr. Maan T. J. MAAROOF, Mousul University, Vetrinary Faculty, Animal Health & animal Hygiene Department, Mousul, Iraq
- Prof. Dr. Mahmut Durmuş, Gebze Teknik University
- Prof. Dr. Mehmet Demirtaş, Bitlis Eren University
- Prof. Dr. Melda Yardımoğlu Yılmaz, Kocaeli University
- Prof. Dr. Mustafa Yaşar, Karabük University
- Prof. Dr. Nardane Yusifova, Azerbaycan Milli ilimler Akademisi, Milli Tarih Müzesi
- Prof. Dr. Novo Palakalovic, Faculty of Economics, University of East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina
- Prof. Dr. Olena Demyanyuk, Institute of Agroecology and Environmental Management, Kyiv, Ukraine
- Prof. Dr. Orhan Gezici, Ömer Halis Demir University
- Prof. Dr. Osman Taylan, King Abdulaziz University, Saudi Arabia
- Prof. Dr. Özgür Sarı, Sinop University
- Prof. Dr. Resul Kara, Düzce University
- Prof. Dr. Sibel Zor, Kocaeli University
- Prof. Dr. Şükrü Dursun, Konya Teknik University
- Prof. Dr. Şükran Güzin Ilıcak Aydınalp, İstanbul Gelişim University
- Prof. Dr. Tamara Milenkovic Kerkovic, Faculty of Economics, University of Nis, Serbia
- Prof. Dr. Erdinç Doğancı, Kocaeli University
- Assoc. Prof. Dr. Ednan Ayvaz, Kocaeli University
- Assoc. Prof. Dr. Ayşegül Türk, Ankara Hacı Bayram Veli University
- Assoc. Prof. Dr. Azeta Tartaraj, Aleksander Moisiu Durres University, Dean of Economic Faculty, Albania
- Assoc. Prof. Dr. Flora Merko, Aleksander Moisiu Durres University, Business Faculty, Albania
- Assoc. Prof. Dr. Eda Bezhani, Aleksander Moisiu Durres University, Business Faculty, Albania
- Assoc. Prof. Dr. Elif Şenkuytu, Atatürk University

- Assoc. Prof. Dr. Brunela Trebicka, Aleksander Moisiu Durres University, Business Faculty, Albania
- Assoc. Prof. Dr. Etem Yeşilyurt, Akdeniz University
- Assoc. Prof. Dr. Ercan Arpaz, Kocaeli University
- Assoc. Prof. Dr. Derya Davarcı, Gebze Teknik University
- Assoc. Prof. Dr. Lyudmyla Symochko, Uzhhorod National University, Ukraine
- Assoc. Prof. Dr. Mehboob Nagarbawdi, Aki's Poona College Of Arts, Science Commerce, India
- Assoc. Prof. Dr. Mehmet Kerim Güllap, Atatürk University
- Assoc. Prof. Dr. Nagip Skenderi, Faculty of Economy, University of Prishtina, Kosovo
- Assoc. Prof. Dr. Natalya Gudkova, The State Ecological Academy, Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine
- Assoc. Prof. Dr. Nermin Demirkol, Kocaeli University
- Assoc. Prof. Dr. Ömer Güngör, Kocaeli University
- Assoc. Prof. Dr. Taner Erdoğan, Kocaeli University
- Assoc. Prof. Dr. Ylber Aliu, AAB College, Public Administration Faculty, Kosovo
- Assoc. Prof. Dr. Yoshito Ando, Kyushu Institute of Technology
- Assoc. Prof. Dr. Fatih Koç, Kocaeli University
- Assoc. Prof. Dr. Hasan Kaya, Kocaeli University
- Assoc. Prof. Dr. Hülya Ünver, Düzce University
- Assoc. Prof. Dr. Samad Rahimi Aghdam, Tabriz University
- Assoc. Prof. Dr. Seher Uçkun, Kocaeli University
- Assoc. Prof. Dr. Selda Uca, Kocaeli University
- Assoc. Prof. Dr. Serpil Özkurt Sivrikaya, Kocaeli University
- Assoc. Prof. Dr. Sinan Aydın, Kocaeli University
- Assist. Prof. Dr. Mazin Nazar Fadhel, College of Environmental Science and Technology Mosul university, Musul, IRAQ
- Assist. Prof. Dr. Mehlika Kocabaş Akay, Kocaeli University
- Assist. Prof. Dr. A. Arzu Arı Bural, Kocaeli University
- Assist. Prof. Dr. Aslıhan Kuyumcu Vardar, Düzce University
- Assist. Prof. Dr. Berna Kavaz Kındığılı, Atatürk University
- Assist. Prof. Dr. Fatih Sevgi, Selçuk University
- Assist. Prof. Dr. Handan Özçelik Bozkurt, Sinop University
- Assist. Prof. Dr. İpek Sucu, İstanbul Gelişim University
- Assist. Prof. Dr. Keisuke Wakizaka, İstanbul Gelişim University
- Assist. Prof. Dr. Oğuz Polatel, Kocaeli University
- Assist. Prof. Dr. Larissa Shragina, Odessa I. I. Mechnikov University
- Assist. Prof. Dr. Rüştü Taştan, Kocaeli University
- Assist. Prof. Dr. Seyil NAJIMUDINOVA, Kırgızistan Türkiye Manas University
- Assist. Prof. Dr. Vedat Tümen, Bitlis Eren University
- Assist. Prof. Dr. Vystavkina Daria, Odessa I. I. Mechnikov University
- Assist. Prof. Dr. Yusuf Budak, Kocaeli University
- Assist. Prof. Dr. Haifa Ben Aziza
- Asisst.Prof. Dr. Asmae Bouziani
- PTech. Dr. Noor Zaitun Yahaya, Universiti Malaysia Terengganu, Malaysia
- PTech. Dr. Isma Rosila, Universiti Malaysia Terengganu, Malaysia
- Phd. Alba Ramallari, Economics Department Faculty of Bussines "Aleksandër Moisiu" University Durrës, Albania
- Phd. Alma Zisi, Economics Department Faculty of Bussines "Aleksandër Moisiu" University Durrës, Albania
- PhD. Blerina Vrenozi, Tirana University, Albania

- Phd. Daniela Lika, Aleksander Moisiu Durres University, Albania
- PhD. Gülşah Keklik, İstanbul Technical University
- PhD. Mirela Alushllari, University of Albania, Albania
- PhD. Jonida Gashi, Aleksander Moisiu Durres University, Albania
- PhD. Olta Nexhipi, “Aleksandër Moisiu” University Durrës, Albania
- PhD. Violeta Neza, Aleksander Moisiu Durres University, Albania
- PhD. Ariola Harizi, Aleksander Moisiu Durres University, Albania
- PhD. Saeid Shojaei, University of Tabriz Department of Electronics and Photonics
- PhD. Ada Aliaj, “Aleksandër Moisiu” University Durrës, Albania
- PhD. Moses M. Solomon, King Fahd University of Petroleum and Minerals
- PhD. Emma Gurashi Nikolaoy, University Of Patras, Greece
- PhD. Hisham M. Alidrisi, King Abdulaziz University, Saudi Arabia
- PhD. Ruhan Özel, Kocaeli University, Türkiye
- PhD. Thawee Numsakulwong, Rajamangala University of Technology Isan, Tayland
- PhD. Reyhan Dadash, Azerbaycan Devlet Pedagoji University, Edebiyat, Azerbaycan
- Lecturer Dr. Barış Demir, Kocaeli University
- Lecturer Dr. Mustafa Of, Kocaeli University
- Lecturer. Dr. Soner Enekci,Kocaeli University

CONTENTS

ABSTRACTS / POSTERS 1

EMERGING TECHNOLOGIES AND AFRICA: AI AND DIGITALIZATION 2

A COMPARATIVE ANALYSIS OF IMPUTATION METHODS USED FOR MISSING DATA COMPLETION 3

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR THE FRICTION MATERIAL USED IN AUTOMOTIVE GEARBOXES 4

INVESTIGATION OF SENSORLESS UNBALANCED LOAD DETECTION METHODS IN HOUSEHOLD WASHING MACHINES 5

MICROBIAL BIOREMEDIATION OF PHARMACEUTICAL-CONTAMINATED SOILS USING A MULTI-STRAIN BACTERIAL CONSORTIUM 6

EVALUATION OF THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF BOATS USED FOR ILLEGAL FISHING IN ISTANBUL WATERS BASED ON THEIR LOA/B RATIO 7

GEOSITE POTENTIAL OF ASAR POND AND ITS SURROUNDINGS IN TAŞKÖPRÜ DISTRICT 8

DISTRIBUTED PARTICLE SWARM OPTIMIZATION FOR SAFE AND EFFICIENT PATH PLANNING OF AUTONOMOUS AERIAL VEHICLES 9

WAVELET-BASED NUMERICAL SOLUTIONS OF MULTI-TERM VARIABLE ORDER FRACTIONARY DIFFERENTIAL EQUATIONS 10

PILOTS ANXIETY ABOUT PERIODIC MEDICAL EXAMINATIONS 11

BIRD STRIKE ANALYSIS OF FUSELAGE SUSPENSION EQUIPMENT: A COMPARATIVE STUDY 12

WAVELET TRANSFORM-BASED FUSION OF THERMAL AND VISIBLE LIGHT IMAGES: DWT AND SWT APPROACHES 13

ANALYSIS OF THE IMPACT OF ON-SITE ENERGY RESOURCE INTEGRATION ON OPERATOR PROFITABILITY AND PEAK LOAD FOR HIGH POWER DEMAND IN A SHOPPING MALL PARKING LOT 14

FROM STRUCTURAL MODELS TO STRATEGIC DECISIONS: THE DETERMINANT ROLE OF SUPPLIER SELECTION CRITERIA IN E-COMMERCE PERFORMANCE 15

PACEMAKER CONTROLLER DESIGN: SIMULATION AND HARDWARE IMPLEMENTATION OF ARRHYTHMIA DETECTION AND EVENT-BASED STIMULATION 16

PROPORTIONAL REASONING LEVELS OF ELEMENTARY MATHEMATICS PRE-SERVICE TEACHERS: A PILOT STUDY 17

CLOUD-BASED AND IOT-SUPPORTED SMART WASTE CLASSIFICATION SYSTEM 18

COMPARATIVE ANALYSIS OF STATE-OF-THE-ART OBJECT DETECTION MODELS UNDER VARYING LIGHTING AND CAMERA ANGLES 19

DEVELOPMENT OF THIOL-FUNCTIONALIZED PBAE NANOPARTICLES FOR DRUG DELIVERY 20

RUL PREDICTION IN AVIATION USING A MACHINE LEARNING□□BASED MULTI-CLASS CLASSIFICATION METHOD 21

TRIANGULAR MATRIX-BASED STEGANOGRAPHY IN COLOR IMAGES 22

ERGONOMIC RISK ASSESSMENT IN AN AUTOMOTIVE ASSEMBLY LINE USING REBA AND JSI METHODS: APPLICATION AND ANALYSIS 23

INVESTIGATION OF THE CORROSION BEHAVIOR OF LASER-TREATED ST42 STEEL SAMPLES USED IN MILITARY SHIPS 24

INFLUENCE OF RASTER ANGLE ON THE FRACTURE BEHAVIOUR OF FDM-PRINTED POLYCARBONATE VIA THE ESSENTIAL WORK OF FRACTURE APPROACH 25

EVALUATION OF THE CENTRAL DISTRICTS OF BURSA IN TERMS OF ANTHROPOGENIC GEOMORPHOLOGY **26**

THE IMPACT OF LEAN IMPROVEMENT PRACTICES (5S-KAIZEN) ON MAKE OR BUY STRATEGY: A MULTICRITERIA MODEL IN THE DEFENSE INDUSTRY **27**

PLDIBG-PF127-PLDIBG BLOCK COPOLYMER SYNTHESIS **28**

AUTOMATIC DETECTION OF EMERGENCY HAND GESTURES IN THE CONTEXT OF VIOLENCE AND COERCIVE CONTROL USING YOLO POSE MODELS **30**

EVALUATION OF PROPERTIES OF DECELLULARIZED-CHICKEN SKIN WITH DIFFERENT METHODS **31**

OTFS CHANNEL ESTIMATION WITH MULTIPLE PILOT **32**

ANTI-CANCER EFFECTIVENESS OF BIOCHANIN A-LOADED NANOCARRIERS FOR THE TREATMENT OF OVARIAN CANCER **33**

MOBILE APPLICATION FOR IRREGULAR WASTE COLLECTION **34**

PERFORMANCE IMPACT OF TEMPORAL FILTERING ON UWB POSITIONING SYSTEMS UNDER NLOS CONDITIONS **35**

DESIGN OF A HIGH POWER DENSITY CONVERTER FOR MILITARY AVIATION SYSTEMS **36**

MODEL PREDICTIVE CURRENT CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS **37**

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF SURFACE TREATMENTS APPLIED TO POLYMER-BASED MATERIALS ON THEIR WETTABILITY PROPERTIES **38**

IMPROVING DEEP HOLE DRILLING PERFORMANCE VIA CUTTING FLUID FORMULATION WITH EXTREME PRESSURE (EP) ADDITIVES **39**

ELECTROLYTIC HARD CHROME PLATING OF CRNIMO STEEL **40**

AUTONOMOUS APPLICATIONS IN LOGISTICS: THE NEW ROUTE OF DIGITAL TRANSFORMATION **41**

FIRE SAFETY ISSUES RELATED TO LITHIUM-ION BATTERY ELECTRIC VEHICLES IN INDOOR PARKING LOTS **42**

DESIGN, PRODUCTION AND EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF BELLOWS AND TWISTING PNEUMATIC ARTIFICIAL MUSCLES **43**

BIOMECHANICAL EVALUATION OF CERVICAL DISC HEIGHT REDUCTION ON SEGMENTAL STABILITY: A FINITE ELEMENT ANALYSIS **45**

INVESTIGATION ON SHAPE DEPENDENT JOINTS **46**

INVESTIGATION OF THE CORROSION PROPERTIES OF HIGH-TEMPERATURE NITRIDED DUPLEX STAINLESS STEEL **48**

INVESTIGATION OF THE BAINITIC TRANSFORMATION IN 100CR6 BEARING STEEL **49**

PRODUCTION OF POLYVINYL ALCOHOL NANOFIBERS CONTAINING TETRABUTYLAMMONIUM TETRAFLUOROBORATE BY USING THE ELECTROSPINNING METHOD **50**

HAZARDS AND RISKS WITHIN THE SCOPE OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY IN AIRPORT GROUND SERVICES: THE CASE OF GÖKÇEADA AIRPORT **52**

ADVANCED POLYMER-BASED HYDROGEL/NANOFIBER COMPOSITE WOUND DRESSING FOR BURN TREATMENT WITH PLANT EXTRACT INTEGRATION **53**

THE EFFECTS OF INDUSTRY 4.0 AND SMART MANUFACTURING ON PRODUCTION PROCESSES: A CASE STUDY FROM THE PACKAGING INDUSTRY **54**

AN EXAMINATION OF THE EFFECT OF PUZZLE-BASED LEARNING ACTIVITIES ON SEVENTH GRADE STUDENTS' MATHEMATICAL REASONING AND SELF-EFFICACY SKILLS **55**

PRODUCTION OF UNIFORM AND DUAL-GRADE LIDINOID STRUCTURES USING PRINT-PAUSE-PRINT TECHNOLOGY AND COMPRESSION MECHANICAL PROPERTIES..... 56

INDUSTRIAL NOISE AND ITS IMPACT ON THE CITY IN KOCAELI..... 57

THE IMPACT OF CHATGPT ON BUSINESSES AND ITS CONTRIBUTIONS TO ORGANIZATIONAL PERFORMANCE..... 58

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF BORON NITRATE AND TITANIUM DIOXIDE DOPED SULFONATED POLY VINYL ALCOHOL BASED COMPOSITE MEMBRANES IN DIRECT BOROHYDRIDE FUEL CELLS..... 59

DEEP LEARNING MODELS FOR EEG-BASED EMOTION RECOGNITION: BINARY CLASSIFICATION OF VALENCE AND AROUSAL DIMENSIONS..... 61

INVESTIGATION OF DISCONTINUITY CONTROLLED FAILURE MECHANISMS IN ABANDONED QUARRY SLOPES..... 62

NECESSITY, DESIGN CRITERIA AND BASIC VERIFICATION METHODS FOR FOUR-WHEELED CARGO BICYCLES..... 63

FULL TEXT PAPERS..... 64

EV TİPİ ÇAMAŞIR MAKİNELERİNDE SENSÖRSÜZ DENGESİZ YÜK ALGILAMA YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ..... 65

HAFİF SİLAHLARDA GERİ TEPME KUVVETİNİN ÖLÇÜMÜNÜN İNCELENMESİ..... 74

OTONOM HAVA ARAÇLARI İÇİN GÜVENLİ VE VERİMLİ ROTA PLANLAMASINDA DAĞITIK PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU..... 83

BIRD STRIKE ANALYSIS OF FUSELAGE SUSPENSION EQUIPMENT: A COMPARATIVE STUDY..... 91

WAVELET TRANSFORM-BASED FUSION OF THERMAL AND VISIBLE LIGHT IMAGES: DWT AND SWT APPROACHES..... 97

ANALYSIS OF THE IMPACT OF ON-SITE ENERGY RESOURCE INTEGRATION ON OPERATOR PROFITABILITY AND PEAK LOAD FOR HIGH POWER DEMAND IN A SHOPPING MALL PARKING LOT..... 108

FROM STRUCTURAL MODELS TO STRATEGIC DECISIONS: THE DETERMINANT ROLE OF SUPPLIER SELECTION CRITERIA IN E-COMMERCE PERFORMANCE..... 116

KALP PİLİ KONTROLÖR TASARIMI: ARİTMİ TESPİTİ VE OLAY TEMELLİ UYARIMIN SİMÜLASYON VE DONANIM GERÇEKLEMESİ..... 124

BULUT ÇÖZÜMLÜ VE NESNELERİN İNTERNETİ DESTEKLİ AKILLI ATIK SINIFLANDIRMA SİSTEMİ..... 131

COMPARATIVE ANALYSIS OF STATE-OF-THE-ART OBJECT DETECTION MODELS UNDER VARYING LIGHTING AND CAMERA ANGLES..... 138

HAVACILIKTA MAKİNE ÖĞRENMESİ-ESASLI ÇOKLU SINIFLANDIRMA METODUYLA RUL TAHMİNİ..... 146

RENKLİ GÖRÜNTÜLERDE ÜÇGEN MATRİS TABANLI STEGANOGRAFİ..... 160

OTOMOTİV MONTAJ HATTINDA REBA VE JSI YÖNTEMLERİYLE ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRMESİ: UYGULAMA VE ANALİZ..... 170

ASKERİ GEMİLERDE KULLANILAN ST42 ÇELİK NUMUNELERİNİN LAZERLE İŞLENMESİ SONUCU KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ..... 178

BURSA MERKEZ İLÇELERİNİN ANTROPOJENİK JEOMORFOLOJİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ..... 186

YALIN İYİLEŞTİRME UYGULAMALARI (5S-KAİZEN) TABANLI MAKE OR BUY STRATEJİSİNE ETKİSİ: SAVUNMA SANAYİNDE ÇOK KRİTERLİ BİR MODEL..... 194

AUTOMATIC DETECTION OF EMERGENCY HAND GESTURES IN THE CONTEXT OF VIOLENCE AND COERCIVE CONTROL USING YOLO POSE MODELS 203

OTFS CHANNEL ESTIMATION WITH MULTIPLE PILOTS 210

DÜZENSİZ ATIK TOPLAMA İÇİN MOBİL UYGULAMA 218

PERFORMANCE IMPACT OF TEMPORAL FILTERING ON UWB POSITIONING SYSTEMS UNDER NLOS CONDITIONS 226

ASKERİ HAVACILIK SİSTEMLERİ İÇİN YÜKSEK GÜÇ YOĞUNLUKLU DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI 234

MODEL PREDICTIVE CURRENT CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS 244

LOJİSTİKTE OTONOM UYGULAMALAR: DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN YENİ ROTASI 255

KAPALI OTOPARKLARDA LİTYUM-İYON BATARYALI ELEKTRİKLİ ARAÇLARLA İLİŞKİLİ YANGIN GÜVENLİĞİ SORUNLARI 263

ŞEKİL BAĞLI SAC BAĞLANTILARININ İNCELENMESİ 272

HAVALİMANI YER HİZMETLERİ BİRİMLERİNDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ KAPSAMINDAKİ TEHLİKE VE RİSKLER; GÖKÇEADA HAVALİMANI ÖRNEĞİ 281

BULMACA TEMELLİ ÖĞRENME ETKİNLİKLERİNİN YEDİNCİ SINIF ÖĞRENCİLERİNİN MATEMATİK MUHAKEME VE ÖZYETERLİK BECERİLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ 289

KOCAELİ'NDE ENDÜSTRİYEL GÜRÜLTÜ VE ŞEHRE ETKİSİ 296

CHATGPT'NİN İŞLETMELERE ETKİSİ VE KURUM PERFORMANSINA KATKILARI 301

DÖRT TEKERLEKLİ KARGO BİSİKLETİ İÇİN GEREKLİLİK, TASARIM ÖLÇÜTLERİ VE TEMEL DOĞRULAMA YÖNTEMLERİ 309

İSTANBUL SULARINDA YASADIŞI AVCILIKTA KULLANILAN TEKNELERİN LOA/B ORANINA GÖRE TEKNİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ 313

ABSTRACTS / POSTERS

The abstract fields of the papers that have met all the conditions of the IMASCON 2025 AUTUMN congress as abstract, poster and full text will be shown on the following pages. In addition, the full texts of the papers that have been applied as full text are available on the following pages.

EMERGING TECHNOLOGIES AND AFRICA: AI AND DIGITALIZATION

JOEL OMINI
Uluslararası Kıbrıs Üniversitesi, Nicosia, North Cyprus, Faculty of Applied Sciences, Management Information Systems
joelitam2@gmail.com

Abstract
Technological convergence is significantly impacting Africa's industrial and socio-economic framework. This study provides a narrative review of literature to critically assess the impact of two transformative technologies Artificial Intelligence (AI) and digitalization on Africa's development landscape. While these technologies have begun to shape various sectors, including healthcare, agriculture, education, and energy, their diffusion remains uneven. Most technological advancements are concentrated in urban and economically advanced areas, creating a digital division that leaves rural and underserved communities with limited access and benefit. This disparity is largely attributed to systemic challenges such as inadequate infrastructure, skill shortages, and disjointed policy implementation across the continent. The study emphasizes that, without strategic and inclusive interventions, the promise of emerging technologies may fail to translate into widespread socio-economic progress. To address this, it proposes actionable recommendations focused on policy reform, digital literacy, infrastructure investment, and multi-stakeholder collaboration. Strengthening these foundational elements is essential to building resilient and inclusive ecosystems that enable all African nations to benefit from technological advancement. Ultimately, equitable access to innovation will be critical to achieving sustainable and inclusive development across the continent.

Keywords: Artificial Intelligence, Digitalization, Socio-economic Development, Technological Development.

Biography

Joel Omini is a doctoral candidate in the Department of Management Information Systems at Cyprus International University, North Cyprus. His research focuses on artificial intelligence adoption, digital transformation, and the intersection of data quality and machine learning in decision support systems. He has presented and contributed scholarly work on topics such as explainable AI, sustainability evaluation, and the role of emerging technologies in Africa's development. His academic and professional pursuits reflect a commitment to bridging theory and practice, with a particular interest in how technology can enhance transparency, trust, and organizational resilience.

A COMPARATIVE ANALYSIS OF IMPUTATION METHODS USED FOR MISSING DATA COMPLETION

ÜMİT TERZİOGLU
Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
umit.terziogl26@gmail.com

Doç. Dr. CAFER BUDAK
Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
cafer.budak@dicle.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8470-4579

Abstract
This study compares the performance of different machine learning methods for addressing the problem of missing data imputation in data mining. In real-world datasets, data loss caused by sensor failures, recording errors, or incomplete measurements often reduces modeling accuracy and prediction reliability. Therefore, accurate estimation of missing values is crucial for ensuring analytical consistency. In this research, the Diabetes dataset was used, where artificial missing values were introduced into numerical variables at rates of 10%, 20%, 30%, and 40%. These missing values were randomly distributed based on the MCAR (Missing Completely at Random) mechanism. Four machine learning methods were applied for imputation: K-Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Regression (SVR), Artificial Neural Network (ANN), and Deep Neural Network (DNN). Each method was evaluated using the R^2, MAE, and RMSE metrics. The results indicated that deep learning-based models (DNN and ANN) achieved higher accuracy at low missing rates, while KNN performed more consistently at moderate levels. The SVR method exhibited variable results depending on parameter sensitivity. Overall, machine learning-based imputation methods provided effective, flexible, and reliable solutions for handling missing data and preserving dataset integrity.

Keywords: Missing Data, Imputation, Machine Learning, Deep Learning

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR THE FRICTION MATERIAL USED IN AUTOMOTIVE GEARBOXES

Fırat AKBAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği
firat.akbas@std.yildiz.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Levent YÜKSEK
Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği
lyuksek@yildiz.edu.tr

Abstract
In dry dual-clutch automotive transmission systems, the temperature-dependent behavior of the friction lining is critical; rising temperature reduces the coefficient of friction and can alter clutch engagement dynamics. In this study, the time- and temperature-dependent variation of the coefficient of friction in a dry dual-clutch system was determined experimentally; in addition, surface roughness was examined by optical microscopy to assess specimen surface topography and relate it to the tribological findings. The acquired data were integrated into a Simulink-based clutch model to evaluate system-level effects. The relationship among coefficient of friction, contact temperature, and friction response was analyzed. In the experimental phase, friction materials taken from clutches with different mileages were tested on a tribometer at ambient temperature and at 100 °C, and the coefficient of friction was recorded continuously throughout the tests. The results show that the coefficient of friction decreases markedly in the high-mileage specimen, especially at 100 °C. These coefficient-of-friction–time curves were supplied to the Simulink clutch model, which produced angular slip rate outputs. The simulations confirm that the decrease in the coefficient of friction leads to higher angular slip rate and prolonged engagement. Thus, the system-level response to temperature- and time-dependent friction changes is quantified via angular slip rate, and the findings provide guidance for control strategies that account for friction-coefficient variation and for the optimization of lining design/parameters in dry dual-clutch applications.

Keywords: Automotive transmission, clutch, friction material, coefficient of friction

INVESTIGATION OF SENSORLESS UNBALANCED LOAD DETECTION METHODS IN HOUSEHOLD WASHING MACHINES

ONURCAN GUNDOGAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
onurcangundogan@gmail.com

Prof. Dr. AHMET FARUK BAKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
fbakan@yildiz.edu.tr

Assistant PhD. ABDULKERİM GUNDOGAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
kerimg@yildiz.edu.tr

Abstract
The unbalanced load problem in household washing machines is a major factor that limits machine performance during the high-speed spin cycle. Excessive vibration and noise caused by the unbalanced load not only induce stress on machine components—shortening their lifespan—but also negatively affect user comfort (Martinello ve ark., 2021). Therefore, washing machines require mechanisms that can detect and correct load imbalance before the spin cycle. In this study, sensorless imbalance mass estimation methods based on algorithmic and machine learning approaches are investigated. Techniques for estimating the mass and distribution of the unbalanced load inside the drum are compared using artificial intelligence–assisted and model-based approaches found in the literature. The main methods are grouped as follows: fuzzy logic and artificial neural networks, observer-based methods, deep learning approaches, and reinforcement learning–based control applications. As a result, it has been observed that sensorless approaches can achieve successful real-time detection and estimation of unbalanced loads while eliminating additional costs. In the discussion section, the strengths and weaknesses of these methods are evaluated, and potential future studies for more accurate predictions are addressed.

Keywords: Washing Machine, Uneven Load, Machine Learning

MICROBIAL BIOREMEDIATION OF PHARMACEUTICAL-CONTAMINATED SOILS USING A MULTI-STRAIN BACTERIAL CONSORTIUM

Prof. Dr. LYUDMYLA SYMOCHKO
University of Coimbra, Faculty of Science and Technology, Life Sciences
lyudmilassem@gmail.com

Prof. Dr. MARIA NAZARÉ COELHO PINHEIRO
Polytechnic University of Coimbra, Coimbra Institute of Engineering, Department of Chemical and Biological Engineering
mnazare@isec.pt

Prof. Dr. OLENA DEMYANYUK
Institute of Agroecology and Environmental Management, Kyiv, Ukraine, Institute of Agroecology and Environmental Management, Kyiv, Ukraine, Institute of Agroecology and Environmental Management, Kyiv, Ukraine
demolena@ukr.net

Abstract
The accumulation of pharmaceutical residues, particularly antibiotics, in terrestrial ecosystems has emerged as a significant global environmental issue. Continuous inputs from agricultural, veterinary, and medical applications have led to the persistence of these compounds in soils, where they disrupt native microbial communities, alter nutrient cycling, and facilitate the proliferation of antibiotic resistance genes (ARGs). Traditional remediation methods, such as chemical oxidation and soil excavation, are often costly, energy-intensive, and environmentally disruptive. Therefore, the development of sustainable, biologically based solutions is a pressing need. This study evaluated microbial bioremediation as a sustainable and eco-friendly approach to mitigating antibiotic contamination in soils. A specialized bacterial consortium, designated as PARC, was formulated to enhance the biodegradation of pharmaceutical residues. The consortium included Pseudomonas fluorescens (6×10^6 CFU/mL H_2O), Azotobacter chroococcum (3×10^6 CFU/mL H_2O), and Rhodococcus phenolicus (3×10^6 CFU/mL H_2O). The mixture was applied at a rate of 100 mL per kilogram of contaminated soil containing 23,800 µg/kg of mixed antibiotic compounds. Over a 180-day incubation under controlled laboratory conditions, the concentration of antibiotic residues in PARC-treated soils decreased to 12,300 µg/kg, whereas the untreated control retained 21,600 µg/kg. The degradation efficiency observed in the consortium-treated soil highlights the synergistic metabolic interactions among the three bacterial species. Mechanisms contributing to this synergy likely include enzymatic oxidation, co-metabolic degradation, and biofilm-mediated stabilization, which collectively enhanced pollutant breakdown and microbial resilience under stress. The high tolerance of the consortium to antibiotic pressure and its ability to reduce contaminant load demonstrate its suitability for large-scale soil restoration projects. Overall, the results confirm that targeted microbial consortia can serve as efficient, cost-effective, and environmentally compatible tools for the remediation of pharmaceutical-contaminated soils. The application of such systems aligns with principles of circular bioeconomy and sustainable land management, offering a promising strategy to restore soil health, protect ecosystem functions, and curb the environmental dissemination of antibiotic resistance.

Keywords: Microbial bioremediation, pharmaceutical contamination, antibiotic residues, bacterial consortium, soil restoration, environmental sustainability.

EVALUATION OF THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF BOATS USED FOR ILLEGAL FISHING IN ISTANBUL WATERS BASED ON THEIR LOA/B RATIO

SAMET YILDIRIM
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Ürünleri
esyueses@hotmail.com

Prof. Dr. HAMDİ AYDIN
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Ürünleri
aydinhamdi@hotmail.com

Abstract
In this study, the technical characteristics of vessels seized for illegal fishing in Istanbul waters between 2020 and 2025 were evaluated according to their LOA/B (Length Overall/Beam) ratio. Following the amendments made to Fisheries Law No. 1380 by Law No. 7091, published in the Official Gazette dated November 22, 2019, and numbered 30956, criminal penalties for illegal fishing and vessel seizure practices have been made more concrete and enforceable. Within this scope, a total of 227 vessels were seized in Istanbul between January 1, 2020, and June 25, 2025. Of these, 75 were trawlers, 126 were used for bivalve mollusk and sea snail fishing, 25 were used for inland water fishing, and 1 was used for gillnet fishing. The study evaluated a total of 86 vessels, including 51 trawlers and 35 bivalve/snail fishing vessels with technical measurements in official records. The results showed that vessels with variable LOA/B ratios over the years were preferred for illegal trawling. The main reasons for this include the estimated quantity of the target population, the desire to avoid inspections, and economic constraints. In illegal bivalve mollusk and sea snail fishing, wooden vessels with a full length of 4–8 m and a high LOA/B ratio were found to be more commonly used. The findings suggest that the LOA/B ratio may be an important determinant of illegal fishing tendencies and contribute to the development of effective control and management strategies in small-scale fisheries.

Keywords: Illegal fishing, trawl fishery, bivalve mollusk fishery, vessel proportion, Istanbul waters.

GEOSITE POTENTIAL OF ASAR POND AND ITS SURROUNDINGS IN TAŞKÖPRÜ DISTRICT

YASİN BOZTEPE
Kastamonu Üniversitesi, SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ, COĞRAFYA
yasin.boztepe01@gmail.com

Prof. Dr. Ekrem MUTLU
Kastamonu Üniversitesi, SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ, COĞRAFYA
emutlu@kastamonu.edu.tr

Abstract
This study aims to evaluate the geomorphological characteristics and geosite potential of the Asar Pond and its surrounding area, located in the Taşköprü district of Kastamonu Province. Based on fieldwork, literature reviews, and the analysis of existing data, it was determined that the pond is situated on a karstic limestone substrate and forms a system where both natural and anthropogenic processes can be observed together. The lithological structure, morphological diversity, and hydrological features of the region demonstrate that the pond represents a site of scientific and educational significance. Karstic depressions, dolines, uvalas, and ponors observed around the pond enhance the morphological diversity and visibility of natural processes, while also supporting the area's educational and research potential. The study revealed that the pond possesses a high landscape value, with slope gradients, sediment accumulations, and water surface contrasts contributing to its visual aesthetics. These features also increase the potential of the area for geotourism and recreational use. Evaluations conducted within the scope of this study indicate that the Asar Pond holds high value in terms of four key criteria defining geosite potential: scientific observability, educational potential, aesthetic value, and conservation capacity. However, the current lack of promotion and infrastructure in the area limits the sustainable use of its geosite values. Therefore, comprehensive planning is necessary for the conservation, management, and sustainable evaluation of the site. In line with the recommendations, it is essential to protect natural processes and morphological features around the pond, provide visitors with informative and guiding facilities, and plan the area's educational and tourism-oriented uses. With proper management and conservation practices, Asar Pond can become a site that enhances awareness of geomorphological heritage at a regional scale and contributes to educational and touristic activities. In conclusion, Asar Pond and its surroundings stand out as an important geosite area with significant scientific, educational, and touristic value, owing to their natural, morphological, and landscape characteristics. Effective management and protection of the area will contribute both to increasing regional environmental awareness and ensuring the sustainable use of natural heritage.

Keywords: Geosite, Asar Pond, Taşköprü

DISTRIBUTED PARTICLE SWARM OPTIMIZATION FOR SAFE AND EFFICIENT PATH PLANNING OF AUTONOMOUS AERIAL VEHICLES

ALPASLAN TETİK
Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aviyonik Mühendisliği
alpaslantetik51@gmail.com

Assoc. Prof. Dr. YAVUZ EREN
Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği
yeren@yildiz.edu.tr

Abstract
Ensuring safe and efficient mission execution for autonomous aerial vehicles requires balanced optimization between navigation safety and operational efficiency during route planning. A route planning method is developed to enable the vehicle to safely avoid static obstacles while minimizing total flight distance within a three-dimensional mission area. The bi-objective optimization problem is formulated using a composite objective function that combines route length and obstacle violation penalties, and solved through multiple Particle Swarm Optimization (PSO) algorithms running in parallel. The parallel structure allows different PSO swarms to explore independent regions simultaneously, increasing solution diversity and improving the likelihood of reaching the global optimum. Initially, an angular region constraint is applied up to a certain distance, directing each swarm toward different search directions and expanding the explored space. After completing their respective searches, the parallel PSO swarms are integrated, and the shortest route is selected through comparative evaluation. Simulation results show that the proposed method achieves a strong balance between safety and distance optimization, operates efficiently in computation time, and produces short, safe, feasible flight paths suitable for real-world autonomous missions.

Keywords: PSO, DPSO, UAV, Aircraft

WAVELET-BASED NUMERICAL SOLUTIONS OF MULTI-TERM VARIABLE ORDER FRACTIONARY DIFFERENTIAL EQUATIONS

SEMA DEMİRBAĞ
Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya- Metalürji Fakültesi, Matematik Mühendisliği
sema.demirbag@std.yildiz.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Arzu TURAN DİNCEL
Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya- Metalürji Fakültesi, Matematik Mühendisliği
artur@yildiz.edu.tr

Abstract
As a mathematical tool that encompass fractional calculus, derivatives, and integral operations, fractional operators can describe many real-world problems more accurately than integer-order operatörs. Variable-order fractional operators, in particular, can effectively model the memory and hereditary properties of systems that vary in time, space, or other conditions, and they stand out as powerful tools for the numerical solution of complex systems and processes in many fields such as physics and engineering. In this study, third-order Chebyshev wavelets are used for the numerical solution of multi-term variable-order fractional differential equations. The fundamental problem is transformed into a system of algebraic equations using third-order Chebyshev wavelet-based operation matrices, and this system is solved numerically. Numerical results are presented to demonstrate the accuracy and effectiveness of the method, showing that high-precision results can be obtained even with a small number of wavelet terms.

Keywords: Fractional order differential equations of variable order, Chebyshev wavelets, wavelet method, operation matrix

PILOTS ANXIETY ABOUT PERIODIC MEDICAL EXAMINATIONS

SELÇUK KAHRAMAN
İstanbul Esenyurt Üniversitesi, MYO, Sivil Havacılık Kabin Hizmetleri
selcukluus@yahoo.com

Prof. Dr. NİHAT ERDOĞMUŞ
İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, İşletme, İşletme
nihat.erdogmus@izu.edu.tr

Abstract
According to the 2023 data of the International Civil Aviation Organization (ICAO), approximately 35 million flights were operated worldwide, and more than 4.1 billion passengers travelled by air. Pilots emerge as the most critical occupational group ensuring the safe completion of these flights. The demanding process of obtaining a commercial pilot license and the extensive, type-specific training required for different aircraft make the substitutability of pilots remarkably low. Moreover, the incident in which an airline pilot deliberately crashed an aircraft with passengers on board drew significant attention to the health status—particularly the mental health—of this crucial occupational group in the aviation sector. To maintain their flight status, pilots are required to fulfill periodic medical examination requirements. Failure to meet these standards may result in the loss of their pilot licenses. This study aims to determine whether pilots experience significant anxiety regarding compliance with period.

Keywords: Aviation, Periodic Medical Examination, Anxiety

BIRD STRIKE ANALYSIS OF FUSELAGE SUSPENSION EQUIPMENT: A COMPARATIVE STUDY

CELAL TUĞRUL AY
Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Savunma Teknolojileri
ay.celaltugrul@gmail.com

Abstract
The aim of this thesis is to investigate the types of payload integration for aircraft and the varieties of suspension equipment used in such integrations, and to assess whether bird strike resistance should be considered as a selection criterion when choosing suspension equipment for integrating a reconnaissance pod on the fuselage station of a multi-role fighter aircraft. Accordingly, two suspension equipment alternatives were evaluated: the centerline pylon and the centerline adapter. The pylon, through its internal sling and auxiliary subsystems, ensures the safe carriage of the payload and allows its release when required. The adapter, in contrast, serves solely to securely carry the payload without providing any release functionality. Bird strike constitutes a critical threat to both the aircraft and its suspension equipment. Therefore, suspension equipment systems, like other structural components, must maintain their primary functions following impact. According to requirements of MIL-HDBK-516C, the pylon is expected to preserve both carriage and release functions, while the adapter must sustain its carriage capability without interruption. For the analyses, the bird model was defined based on the EN-SB-12-002 Bird Strike Database with a mass of 1.82 kg and an impact velocity of 180 m/s, and modelled using the SPH method. Both the pylon and adapter were assigned Al 7075-T6 material, and the Johnson–Cook material model was applied. This approach eliminated material differences, allowing the effects of geometric design variations on structural performance to be evaluated. In the initial analyses, stresses exceeding the material limits and fractures were observed on the leading surfaces of both structures. Therefore, the leading surfaces were reinforced, and the analyses were repeated. In the revised configuration, stresses remained below the yield limit, deformations occurred within the elastic range, and structural integrity was preserved. As a result, reinforcing the leading surfaces provides sufficient bird strike resistance for both the pylon and the adapter. Therefore, selecting the pylon or adapter for reconnaissance pod integration need not be based on bird strike resistance. The optimal suspension equipment should instead be determined according to the operational requirements of the payloads intended for the respective station.

Keywords: Aircraft, Payload Integration, Suspension Equipment, Adapter, Pylon, Bird Strike Analysis

WAVELET TRANSFORM-BASED FUSION OF THERMAL AND VISIBLE LIGHT IMAGES: DWT AND SWT APPROACHES

YÜCEHAN DEMİR
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
yucehan1172@hotmail.com

Assoc. Prof. Dr. ANIL ÇELEBİ
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
anilcelebi@kocaeli.edu.tr

Assistant BURAK ÇELİK
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
burak.celik@kocaeli.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. AYSUN TAŞYAPI ÇELEBİ
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
aysun.tasyapi@kocaeli.edu.tr

Abstract
Fusion of thermal and RGB images has emerged as an important research area, particularly in engineering applications such as computer vision, object detection, remote sensing, and medical imaging. Image fusion aims to transform images obtained from different sources into a single, more informative, high-quality image. In this process, wavelet-based methods such as the Discrete Wavelet Transform (DWT) and Stationary Wavelet Transform (SWT) are widely used to effectively combine the multi-scale and multi-frequency features of both thermal and RGB images. This literature review will focus on the applications of DWT and SWT-based fusion techniques to thermal and RGB images, and will examine existing methods and recent developments in detail.

Keywords: Image Fusion, Wavelet Transform, SWT, DWT, Thermal Image, RGB Image, IDWT

ANALYSIS OF THE IMPACT OF ON-SITE ENERGY RESOURCE INTEGRATION ON OPERATOR PROFITABILITY AND PEAK LOAD FOR HIGH POWER DEMAND IN A SHOPPING MALL PARKING LOT

EMİRCAN AYKAR
İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği
aykar18@itu.edu.tr

Assistant PhD. CENK ANDİÇ
İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
andic18@itu.edu.tr

Prof. Dr. BELGİN TÜRKAY
İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
turkayb@itu.edu.tr

Abstract
A photovoltaic (PV) system integration strategy is examined in this study for a shopping mall (SM) parking lot equipped with two DC fast-charging stations. Built on the existing charging and pricing framework and using real user data, the study focuses on the impact of rooftop PV deployment on operator profitability and grid loading. Due to structural and architectural constraints of the SM rooftop, only a limited surface area is available for PV installation. Within these physical limits, a total of 182 PV panels, providing 102 kWp of installed capacity and configured as 13 series-connected modules per string and 14 strings, have been defined and integrated with the DC fast-charging infrastructure. Within the established framework, power flows between the grid and PV generation are coordinated and the requirement that the user reaches the target battery energy is satisfied. The PV panel array is modeled, in accordance with the SM's location, as a generation profile over a representative day. In time intervals where PV generation is available, this profile reduces the energy drawn directly from the grid. In addition, simulation results comparing the grid-only reference case and the PV-integrated case show that the rooftop PV application can significantly increase operator profit by 80%, reduce operator energy cost by 58% by decreasing the net energy taken from the grid, and at the same time lower the peak demand at the point of common coupling. By providing a de-peaked load profile and more sustainable charging behavior during hours when the renewable resource is available, PV-supported operation demonstrates that even a physically limited PV installation can offer considerable economic and technical benefits for DC fast-charging operators. Thus, the results indicate that investigating the shifting of the charging process to periods with high PV generation would be a worthwhile direction for future research.

Keywords: DC fast charging, photovoltaic (PV) system integration, operator profitability, peak load, load profile, shopping mall parking lot

FROM STRUCTURAL MODELS TO STRATEGIC DECISIONS: THE DETERMINANT ROLE OF SUPPLIER SELECTION CRITERIA IN E-COMMERCE PERFORMANCE

RAMAZAN TOPDEMİR
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik, Endüstri Mühendisliği
rmtd3406@gmail.com

Prof. Dr. GÜLŞEN AKMAN
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik, Endüstri Mühendisliği
akmang@kocaeli.edu.tr

Abstract
The rapid growth of e-commerce has driven the need for new approaches in supply chain management. As the competitive environment for companies undergoes significant changes, supplier selection has traditionally remained tactical and cost-oriented, negatively impacting company performance in the long run. Although many supplier selection criteria have been determined in the literature, they often do not account for modeling the complexities and interdependencies between these criteria that characterize the e-commerce environment. Consequently, managers are deprived of a robust decision-making structure for strategic alternatives. In this context, a structural model has been developed to identify the critical determinants of supplier performance and transform these insights into an actionable strategic framework. A multi-stage methodology was developed in this study. First, a systematic literature review and a Delphi study with industry experts were conducted to determine the criteria for supplier selection and prioritization on e-commerce platforms. Second, Interpretive Structural Modeling (ISM) was applied to establish the structural relationships among determined criteria. One of the study's main findings is the creation of a seven-level causal model showing that non-financial criteria such as "quality" and "customer service" act as drivers of performance. It is also found that traditional financial criteria such as "cost" and "profitability value" are dependent outcomes rather than strategic levers. This structural model provides a practical framework for managers. By enabling the adoption of a strategy that focuses on priority performance areas rather than approaches that emphasize financial metrics, it supports companies in making more robust and data-driven decisions. Making supplier selection consistent with performance-determining criteria enables companies to build more robust supply chains and gain a long-term competitive advantage.

Keywords: Supplier Selection, E-commerce, Interpretive Structural Modeling (ISM), Strategic Decision-Making, Supply Chain Management.

PACEMAKER CONTROLLER DESIGN: SIMULATION AND HARDWARE IMPLEMENTATION OF ARRHYTHMIA DETECTION AND EVENT-BASED STIMULATION

CANER ÖZDEMİR
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
caner.ozdemir@kocaeli.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. OĞUZHAN KARAHAN
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
oguzhan.karahan@kocaeli.edu.tr

Abstract
In this study, an event-based detection and stimulation approach is proposed to ensure rhythm continuity in cardiac pacemaker systems. A physiologically realistic heartbeat was generated in the Simulink environment using a transfer function based ECG model, and an accompanying sensing and inference architecture was designed to detect rhythm irregularities from this signal. The architecture consists of four principal components: preprocessing filters for suppressing high frequency noise, an event detector for identifying ventricular activity, an inter beat interval calculator for measuring the time between successive activations, and a time based escape interval monitor that intervenes when a natural beat fails to occur within the expected duration. When the inter beat interval exceeds the predefined threshold, the system generates a stimulation pulse within physiological limits to compensate for the missing heartbeat. Simulation results demonstrate that the proposed architecture operates stably under regular rhythm conditions and reliably produces a stimulation pulse at the end of the escape interval when rhythm loss occurs. The architecture was additionally implemented on an STM32 microcontroller in real time, and oscilloscope measurements confirmed a high degree of correspondence with the Simulink outputs in terms of amplitude, pulse width, and timing. These findings indicate that the proposed approach successfully integrates both sensing and pacing functionalities within a unified framework. Moreover, its modular structure provides a solid foundation for the development of advanced closed-loop control mechanisms in future studies. Simulation results demonstrated that the proposed pathway operated stably under regular rhythm conditions and reliably generated a stimulation pulse when rhythm interruption occurred, precisely at the end of the defined escape interval. The same structure was implemented in real time on an STM32 microcontroller, and oscilloscope measurements confirmed a high degree of agreement between the generated stimulation pulses and the Simulink outputs in terms of amplitude, pulse width, and timing. The findings indicate that the developed approach successfully integrates both sensing and stimulation functions within a unified framework and can ensure rhythm continuity during intrinsic beat absence. Furthermore, the modular architecture provides a basis for future work, where heart-rate regulation controllers may be incorporated to construct a comprehensive pacemaker control system.

Keywords: Cardiac pacemaker, Rhythm-loss detection, Event-based stimulation, Pacemaker control, Real-time embedded system

PROPORTIONAL REASONING LEVELS OF ELEMENTARY MATHEMATICS PRE-SERVICE TEACHERS: A PILOT STUDY

Assist. Prof. Dr. SEMAHAT İNCİKABI
Sinop Üniversitesi, EĞİTİM FAKÜLTESİ, MATEMATİK VE FEN BİLİMLERİ EĞİTİMİ BÖLÜMÜ-İLKÖĞRETİM MATEMATİK ÖĞRETMENLİĞİ
sincikabi@sinop.edu.tr

Abstract
Proportional reasoning is a key cognitive skill supporting the understanding of mathematical concepts and enabling problem solving in contexts. Highlighting proportional relationships in the curriculum helps students recognize mathematics as a connected structure (Van Dooren et al., 2018). However, studies show that learners frequently face challenges with ratio and proportion, often displaying flawed reasoning (Umay & Kaf, 2005). Therefore, developing proportional reasoning is crucial in mathematics teacher education. This descriptive qualitative pilot study examined the proportional reasoning levels of 40 pre-service elementary mathematics teachers. Four problems representing Langrall and Swafford's (2000, as cited in Çıkla & Duatepe, 2002) classification were used. Participants' written solutions were evaluated through content analysis and categorized as correct, flawed, or weak reasoning. Results indicate that participants struggled with early-level tasks. In the Level 0 problem, only 12.5% provided correct reasoning, while most relied on additive comparisons, leading to 60% flawed and 27.5% weak responses. At Level 1, correct reasoning increased to 30%, yet 47.5% of participants interpreted proportional relationships superficially. The Level 2 problem produced the highest weak reasoning rate (55%); participants tended to make intuitive assumptions rather than use proportional logic. In contrast, at Level 3, 72.5% of the participants applied unitized quantities, suggesting stronger reasoning at more formal levels. Overall, findings show that foundational proportional reasoning skills have not developed sufficiently among pre-service teachers. Although their success improves with advanced structures, teacher education programs should focus on strengthening early proportional reasoning to support long-term conceptual growth. Expanding this research with a larger sample may contribute to a deeper understanding of the issue.

Keywords: Proportional reasoning, flawed reasoning, weak reasoning

References

Çıkla, O. A., & Duatepe, A. (2002). İlköğretim matematik öğretmen adaylarının orantısal akıl yürütme becerileri üzerine niteliksel bir çalışma [A qualitative study on proportional reasoning skills of pre-service elementary mathematics teachers] [in Turkish]. Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 23(23). Umay, A., & Kaf, Y. (2005). Matematikte kusurlu akıl yürütme üzerine bir çalışma [A study on flawed mathematical reasoning] [in Turkish]. Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 28(28), 188–195. Van Dooren, W., Vamvakoussi, X., Verschaffel, L., Marope, M., Vosniadou, S., Anderson, L., … & Popa, S. (2018). Proportional reasoning.

CLOUD-BASED AND IOT-SUPPORTED SMART WASTE CLASSIFICATION SYSTEM

Engineer ENES BAYTÜRK
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
enesbayturk.96@gmail.com

Engineer ANIL ÇALIŞKAN
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
anil.caliskan@brisa.com.tr

Abstract
Environmental problems, such as the increase in waste quantity and the consumption of natural resources, are causing serious harm to the World. Effective recycling is of critical importance in combating these problems. Carrying out recycling processes correctly ensures the protection of natural resources, energy savings, and the reduction of greenhouse gas emissions. However, complex waste classification systems and a lack of awareness lead to a decrease in recycling success. In this study, a smart waste classification system aimed at facilitating waste recycling and raising awareness is proposed. In the developed system, the user places the waste into the waste chamber, and the system detects the motion. The YOLOv5 model, trained on the Azure service, detects the waste type, displays it on the screen, and alerts the user. Subsequently, the user removes the waste from the chamber and disposes of it in the appropriate recycling bin. Additionally, the amount of recycled waste can be tracked through the system. The YOLOv5 model was trained via the Azure service using a dataset containing 21,453 waste data samples across 8 classes, achieving a success rate of approximately 83% on the test data. With the proposed smart waste classification system, both the correct classification of waste and increased public awareness are ensured.

Keywords: Waste Classification, Object Detection, Deep Learning

COMPARATIVE ANALYSIS OF STATE-OF-THE-ART OBJECT DETECTION MODELS UNDER VARYING LIGHTING AND CAMERA ANGLES

Engineer YUSUF YALÇIN
İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Yapay Zeka
yusuf.yalcin@triomobil.com

Engineer BAHADIR GÖLCÜK
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yapay Zeka
bahadir.golcuk@triomobil.com

Prof. Dr. OĞUZHAN URHAN
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
urhano@kocaeli.edu.tr

Abstract
The performance of object detection algorithms is significantly affected by environmental conditions that differ from the training data. In this study, the performances of state-of-the-art deep learning-based object detection models are investigated under varying illumination levels and camera fields of view (FoV). Within the scope of the study, a unique dataset comprising 10 classes was created using lenses with viewing angles of 70°, 125°, and 180° under illumination intensities of 3, 50, and 90 lux. The detection performance of the YOLOv9, YOLOv11, and RF-DETR models was compared on the collected data. Experimental results showed that detection accuracy improved as ambient light intensity increased, with the improvement more pronounced in wide-angle shots. However, as the field of view (FoV) increased, the object dimensions in the image decreased, leading to a decline in the models' detection precision. In the conducted tests, the highest performance was achieved under 90 lux illumination with 70° and 125° viewing angles.

Keywords: Object Detection, Artificial Intelligence, Camera View

DEVELOPMENT OF THIOL-FUNCTIONALIZED PβAE NANOPARTICLES FOR DRUG DELIVERY

Lecturer PhD. KEVSER BAL
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği
kevser.bal@iuc.edu.tr

Abstract
In this study, a thiol-containing mucoadhesive nanoparticle platform was developed through the functionalization of PβAE chains with N-acetyl-L-cysteine, and its potential as a drug delivery carrier was evaluated. PβAE was synthesized via Michael addition polymerization under controlled conditions at 50 °C for 48 h. Following polymerization, the terminal amine groups of the polymer chains were conjugated with N-acetyl-L-cysteine, whose carboxyl groups were activated using N,N′-dicyclohexylcarbodiimide (DCC). The chemical structures before and after modification were confirmed using FTIR spectroscopy. The proton-buffering capacity of the modified polymer was evaluated by acid–base titration, yielding a value of 7 mmol H^+/g polymer. Nanoparticles were prepared and optimized using the nanoprecipitation technique. Dynamic light scattering (DLS) analysis revealed that blank nanoparticles exhibited an average size of 140.0 ± 5.15 nm, a PDI of 0.17 ± 0.02, and a zeta potential of 27.6 ± 3.32 mV. Nanoparticles loaded with curcumin, selected as the model drug, were characterized by a size of 184.2 ± 8.42 nm, a PDI of 0.05 ± 0.04, and a zeta potential of 22.3 ± 2.33 mV. UV–Vis spectrophotometric analysis demonstrated an encapsulation efficiency of 58.73%. Drug release studies were conducted under tumor-mimicking acidic conditions (pH 5.0) and physiological pH 7.4. After 72 h, cumulative release reached 34.62% at pH 5.0 and 20.59% at pH 7.4; at 144 h, release increased to 55.70% and 31.40%, respectively. These findings indicate that N-acetyl-L-cysteine–modified PβAE nanoparticles exhibit enhanced release behavior under acidic conditions. Mucoadhesion studies demonstrated that the presence of free thiol groups enabled dynamic interactions with mucin, resulting in a binding efficiency of 34%. Overall, the results demonstrate that N-acetyl-L-cysteine-modified PβAE nanoparticles represent a promising carrier system for drug delivery applications.

Keywords: Poly(β-amino ester), N-acetyl-L-cysteine, nanoparticle, drug delivery system

RUL PREDICTION IN AVIATION USING A MACHINE LEARNING□□BASED MULTI-CLASS CLASSIFICATION METHOD

MURAT MUŞTU
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilim ve Teknolojileri
226164002@kocaeli.edu.tr

Prof. Dr. FARUK ARAS
Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Elektrik Elektroniği Bölümü
faruk.aras@kocaeli.edu.tr

Prof. Dr. MEHMET MELİH İNAL
Kocaeli Üniversitesi, Enformatik Bölüm Başkanlığı, Enformatik Bölümü
melih.inal@kocaeli.edu.tr

Abstract
This study aims to develop a Predictive Maintenance (PdM) model using a Machine Learning classification approach to determine the optimal maintenance times for aircraft and their components based on historical data. The goal is to enable the systematic use of existing and collected flight and/or failure data (model input) and to generate the most accurate Remaining Useful Life (RUL) or Time To Failure (TTF) predictions, thereby preventing potential failures at the most cost-effective moment. In this study, aircraft engines have been selected as the application field for the RUL prediction model being developed, due to both their operational criticality and the availability of publicly accessible Commercial Modular Aero-Propulsion System Simulation (C-MAPSS) datasets of aircraft turbofan engines provided by NASA, which have been widely used in the literature. Unlike the regression and binary classification methods commonly used in the literature for traditional Machine Learning–based RUL estimation, this study employs a multi-class (three-class) classification framework. By defining a "warning" category that precedes the "alarm" state, the model being developed allows users to track RUL more closely before engines reach critical conditions. Besides, to ensure a systematic model development process., the study also draws on the "Machine Learning-Based PdM Model Development Workflow" by the aid of MATLAB. Among 33 supervised Machine Learning classification algorithms available in MATLAB, the best PdM model has been identified based on their comparative evaluation after the completion of training, validation, and testing. The evaluation metrics have been selected as the F1-score and, in particular, the accuracy of predicting engines in the "alarm" category (RUL<10), as this represents the most critical class for maintenance decision-making, rather than the overall accuracy across all categories.

Keywords: Aviation, Predictive Maintenance, RUL Estimation, Machine Learning

TRIANGULAR MATRIX-BASED STEGANOGRAPHY IN COLOR IMAGES

NİLHAN SAYIN YANILMAZ
Kocaeli Üniversitesi, FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ, MATEMATİK
nilhanyanilmaz@outlook.com

Assoc. Prof. Dr. HÜLYA KODAL SEVİNDİR
Kocaeli Üniversitesi, FEN EDEBİYAT FAKÜLTESİ, MATEMATİK
hkodal@kocaeli.edu.tr

Abstract
Over the past few decades, digital communication has played a critical role in many sectors, particularly healthcare institutions, the banking sector, information technology enterprises, and various industrial fields. Today, the fact that virtually all data flow occurs over the internet necessitates the secure transfer of information from source to destination. Cryptography and steganography techniques are widely used to ensure data integrity and confidentiality in insecure and open network environments. In this study, the secret data and cover images are color images sized square. After being separated into RGB layers, the secret data, selected in square dimensions, is divided into three fractions: lower triangular matrix, upper triangular matrix, and diagonal matrix using the triangular matrix method. The resulting fractions are embedded into the detail coefficients of the cover images using the Discrete Wavelet Transform. The secret image is reconstructed by combining the fractions obtained from the embedded cover images. Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) and Structure Similarity Index Method (SSIM) values were examined between the resulting image and the cover image.

Keywords: steganography, wavelet transform, color image

ERGONOMIC RISK ASSESSMENT IN AN AUTOMOTIVE ASSEMBLY LINE USING REBA AND JSI METHODS: APPLICATION AND ANALYSIS

MELEK DURMUŞ
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
melekddurmus@gmail.com

Assist. Prof. Dr. HATİCE ESEN
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
hatice.eris@kocaeli.edu.tr

Abstract
In today's rapidly industrializing production environments, the effectiveness of the human factor and the ergonomic suitability of working conditions play a crucial role in maintaining sustainable operational performance. Particularly in the automotive industry, where fast-paced workflows, short cycle times, and repetitive manual activities are common, assembly line operators are frequently exposed to awkward postures, repetitive hand–wrist movements, and manual handling of heavy loads. Such physical demands significantly increase the likelihood of developing musculoskeletal disorders. As highlighted in the literature, inadequate ergonomic conditions not only affect employee health but also negatively influence product quality, labor productivity, absenteeism rates, and overall operational costs. In this study, ergonomic risks in selected automotive assembly stations were evaluated using two widely accepted assessment methods: REBA (Rapid Entire Body Assessment) and JSI (Job Strain Index). The REBA method provides a macro-level perspective by assessing whole-body posture, trunk inclination, leg position, and load handling, while the JSI method focuses on micro-level stressors such as wrist posture, force exertion, repetition, and task duration. The analysis revealed that several stations exhibited high-risk scores, indicating an urgent need for corrective measures and workstation redesign. The findings demonstrate that using REBA and JSI together provides a more comprehensive evaluation of ergonomic exposure. While REBA effectively identifies general postural risks, JSI captures the detailed upper-limb strain that may not be visible in whole-body assessments. This integrated approach enhances the accuracy of ergonomic risk identification and supports the development of more effective improvement strategies.

Keywords: Ergonomics, REBA, JSI, assembly line

INVESTIGATION OF THE CORROSION BEHAVIOR OF LASER-TREATED ST42 STEEL SAMPLES USED IN MILITARY SHIPS

KAMİLE ERTÜRK
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Elektro Optik Sistem Mühendisliği
kamileerturk43@gmail.com

Prof. Dr. ERSİN KAYAHAN
Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Fakültesi, Denizcilik Fakültesi
kayahan@kocaeli.edu.tr

Abstract
Corrosion is defined as the degradation of metallic materials through chemical and electrochemical reactions triggered by environmental factors, and it leads to significant structural and economic losses, particularly in steel structures used in the maritime industry. Aggressive environmental conditions such as high-chloride saltwater, dissolved oxygen, humidity, and temperature fluctuations substantially accelerate the corrosion rate on steel surfaces, posing critical risks to reliability and durability in structures such as military vessels. Therefore, new-generation surface modification techniques are required to enhance the corrosion resistance of steel components. In this study, the effect of laser surface treatment on the corrosion behavior of ST42 steel, which is widely used in marine applications, was investigated. In the experimental work, various laser parameters (laser power, scanning speed, and focal distance) were applied to modify the surface of the specimens. Treated and untreated samples were compared in terms of surface morphology, roughness variation, and oxide layer formation. Optical microscopy and surface roughness measurements were employed for surface characterization. For corrosion testing, the samples were exposed to a saline water environment, and pre- and post-corrosion mass measurements were conducted using a precision balance. This allowed the quantitative determination of the effects of laser processing parameters on corrosion rate and mass loss. Preliminary findings indicate that an appropriately formed thin oxide layer and the modified micro-morphology generated by laser treatment can enhance corrosion resistance. The obtained results are expected to contribute to extending the service life of naval steel plates, reducing maintenance costs, and providing a scientific foundation for the use of domestic laser technologies in the maritime sector for surface protection purposes. The study presents an innovative laser-based approach applicable both in the defense industry and in general surface engineering.

Keywords: ST42 steel, corrosion, laser surface treatment, saltwater corrosion

INFLUENCE OF RASTER ANGLE ON THE FRACTURE BEHAVIOUR OF FDM-PRINTED POLYCARBONATE VIA THE ESSENTIAL WORK OF FRACTURE APPROACH

Lecturer YUSUF YAĞCI
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD
yusufyagci@gmail.com

Prof. Dr. N. GAMZE KARSLI
Kocaeli Üniversitesi, Havacılık Ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Ve Uzay Mühendisliği Bölümü
gamze.karsli@kocaeli.edu.tr

Prof. Dr. TANER YILMAZ
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
taner.yilmaz@kocaeli.edu.tr

Abstract
This study comprehensively investigates the effects of raster angle configurations (0°, 45°, 90°, and 0/90/0°) on the mechanical, thermomechanical, and tribological properties of polycarbonate (PC) specimens produced using the Fused Filament Fabrication (FFF) method. The fracture behaviour was analysed using the Double-Edged Notched Tensile (DENT) test with the Essential Work of Fracture (EWF) method. The findings of the study indicated that filament orientation exerts a substantial influence on crack propagation and energy absorption. The 0/90/0° configuration demonstrated the highest fracture toughness (we = 15.19 kJ/m²) as a consequence of its hybrid structure. The 90° configuration demonstrated a propensity for brittle fracture behaviour, attributable to inadequate interlayer bonding. In contrast, the 0° and 45° configurations exhibited a ductile and semi-ductile nature, respectively, distinguished by their notable energy absorption capacity and compliance with EWF analysis. In tensile tests, the 0/90/0° structure demonstrated the highest tensile strength (67.35 ± 0.24 MPa), while the 90° structure exhibited the lowest value (50.76 ± 0.30 MPa). In the context of tribological evaluations, the 0/90/0° structure demonstrated optimal performance, exhibiting a low friction coefficient (~0.12) and a regular wear surface. Conversely, high friction (~0.45) and irregular wear were observed in the 90° samples. The results of the Dynamic Mechanical Analysis demonstrated that the 0/90/0° structure exhibited enhanced stability in maintaining its storage modulus as the temperature increased. In conclusion, it is evident that the raster angle is a decisive factor in all structural and surface performance parameters of PC structures produced with FDM. The 0/90/0° configuration is regarded as the optimal structure for engineering applications, owing to its balanced and superior properties.

Keywords: FFF (Fused Filament Fabrication), raster angle, EWF (Essential Work of Fracture), polycarbonate, fracture toughness, tribology, thermomechanical properties

EVALUATION OF THE CENTRAL DISTRICTS OF BURSA IN TERMS OF ANTHROPOGENIC GEOMORPHOLOGY

EDA NUR ÇALIŞKAN
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, İnsan ve Toplum bilimleri fakültesi, Coğrafya
edanurtosun99@gmail.com

Assist. Prof. Dr. Ebubekir KARAKOCA
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, İnsan ve toplum bilimleri fakültesi, coğrafya
ebubekir.karakoca@bilecik.edu.tr

Abstract
Today, increasing population, rising economic demands, and intensifying land use have made anthropogenic geomorphological impacts increasingly visible in both extent and intensity. This situation has significantly elevated the importance of anthropogeomorphology, a discipline that examines the role of human activities in the formation and transformation of landforms. In countries where population growth and economic activities are concentrated, the spatial effects of anthropogenic geomorphological changes extend over broader areas, and their consequences on morphological systems become more evident. The primary aim of this study is to reveal the effects of anthropogenic activities concentrated in the central districts of Bursa on geomorphological processes and units. To this end, field-based observations were combined with up-to-date satellite imagery, and the Potential Anthropogenic Change Index (PACI), widely used in anthropogeomorphological studies, was calculated to quantitatively assess the degree of anthropogenic transformation in the region. The findings indicate that, with accelerating population growth and migration, the central districts of Bursa have become the most intensively transformed areas of the city. In these districts, significant increases were identified in activities such as quarrying, the expansion of excavation and fill areas, rising construction density, the proliferation of road transportation projects, as well as the development of recreational zones and irrigation canals. These features constitute anthropogenic impacts that alter, constrain, or redirect natural morphodynamic processes at various scales. According to the PACI analysis, the calculated value of 0.30 for Bursa's central districts indicates a moderate level of anthropogenic transformation. This suggests that existing anthropogenic pressures can be managed sustainably through appropriate planning and conservation strategies; however, if necessary measures are not taken, there is a risk that anthropogenic processes will reach higher levels of impact. In conclusion, the study demonstrates that anthropogenic geomorphological processes in Bursa are becoming increasingly prominent, leading to disturbances in the natural morphodynamic balance at different scales. Considering that such disturbances may cause more serious environmental and economic problems in the future, strengthening the anthropogeomorphological approach, effectively employing interdisciplinary methods, developing scientifically grounded environmental policies and conservation strategies, and adopting sustainable land-use principles are of critical importance.

Keywords: Anthropogenic Geomorphology, Bursa, Human-Induced Changes

THE IMPACT OF LEAN IMPROVEMENT PRACTICES (5S-KAIZEN) ON MAKE OR BUY STRATEGY: A MULTICRITERIA MODEL IN THE DEFENSE INDUSTRY

ÖZGÜR ERDEM
Başkent Üniversitesi, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, FEN Fen Bilimleri Fakültesi / Endüstri Mühendisliği Bölümü ENSTİTÜSÜ
ozgurerdem77@gmail.com

Assist. Prof. Dr. GÖZDE ÖNDER UZUN
Başkent Üniversitesi, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, Fen Bilimleri Fakültesi / Endüstri Mühendisliği Bölümü
gonder@baskent.edu.tr

Abstract
Increasing competition in the defense industry, cost pressures, and the critical importance of delivery times are driving companies to restructure their processes based on lean manufacturing principles. In this context, lean improvement methods such as 5S and Kaizen both increase the efficiency of the production line and directly influence companies' strategic make-or-buy decisions. Whether production is met with internal resources or through procurement is shaped by multidimensional criteria in the defense industry, such as operational flexibility, quality reliability, error rates, standardization, and supply chain alignment. This study aims to determine the impact of lean improvement practices (5S and Kaizen) on the make-or-buy strategy and to develop a comprehensive multi-criteria evaluation model for the defense industry. Within the scope of the research, a unique evaluation structure consisting of six criteria was created based on the key performance indicators of the lean production approach, and both internal production (make) and external procurement (buy) scenarios were analyzed within this framework. The research methodology included the integration of multi-criteria decision-making techniques. First, the relative importance weights of the criteria were determined using the Analytic Hierarchy Process (AHP), and then these weights were integrated into the TOPSIS and MOORA methods to rank the alternatives in terms of their simple performance indicators. Thanks to AHP, a consistent prioritization of criteria was achieved; TOPSIS measured the proximity of alternatives to the positive ideal; and MOORA calculated the net benefit ratios, resulting in an integrated model. The findings reveal that in lean improvement-focused scenarios, in-house production (make) outperforms external procurement (buy). In particular, in-house production options clearly stand out in criteria focused on 5S–Kaizen, such as workflow efficiency, error reduction potential, and standardization. In contrast, although outsourcing scenarios offer advantages in terms of supply chain alignment, they fail to achieve the same level in lean indicators.

Keywords: 5S, Kaizen, Lean Manufacturing, Make-buy

PLDIBG-PF127-PLDIBG BLOCK COPOLYMER SYNTHESIS

PhD. Yonca Çolak
Kocaeli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya
yoncacolak92@gmail.com

Özge Gürler
Kocaeli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya
ozgeegurler@gmail.com

Prof. Dr. Olcay Mert
Kocaeli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya
olcay.mert@kocaeli.edu.tr

Abstract
Pluronic F127 (PF127) is an amphiphilic triblock copolymer composed of poly(ethylene oxide) (PEO) and poly(propylene oxide) (PPO) with the PEO-PPO-PEO structure (Menon et al., 2012). PF127 is approved by the US Food and Drug Administration (FDA) due to its many positive properties, including good hydrophilicity, biocompatibility, and biodegradability. Due to its heat-sensitive thermogel properties, it is frequently used in drug delivery systems (DDS) and biomedical fields, usually in hydrogel or micellar form (Menon et al., 2012; Li et al., 2023; Luo et al., 2017). Although PF127 is generally used in DDSs to increase the solubility of hydrophobic drugs, PF127 alone can partially solubilize hydrophobic drugs. As a solution, polylactide (PLA) can be grafted onto both ends of Pluronic F127, and PLA-F127-PLA block copolymers can be obtained to increase the hydrophobicity of the system (Li et al., 2023; Xiong et al., 2005; Xiong et al., 2003). Substituted glycolides are structural analogs of lactide, they can be used to modify the physical properties of polylactides such as Tg, crystallinity, hydrophobicity/hydrophilicity, and degradability (Çolak et al., 2024). This study involves the copolymerization of L-diisobutyl glycolide (LDIBG), a substituted glycolide derivative with a more hydrophobic structure than lactide, using Pluronic F127 as an initiator, via ring-opening polymerization (ROP) in the presence of Sn(Oct)2 catalyst. Characterization of the synthesized copolymers was carried out using spectroscopic (ATR-FTIR, NMR), chromatographic (GPC), thermal (DSC, TGA) and diffraction-based (WAXD) methods. PLDIBG-PF127-PLDIBG block copolymer was planned as potential drug carriers with better solubility for hydrophobic drugs.

Keywords: PF127, substituted glycolide, LDIBG, ROP, copolymer.

Acknowledgements: We are grateful for the financial support provided by Kocaeli University Scientific Research Projects Fund under project codes FAA-2025-4334 and FDK-2022-2899.

REFERENCES

Çolak, Y., Belen, S. N., Çetin, D., Cengiz, U., Mert, O. (2025). Symmetric Star Poly (Substituted Glycolide) Homopolymers and Their Surface Properties. *Polymer Chemistry*, *16*(3), 317-330.

Li, S., Yang, C., Li, J., Zhang, C., Zhu, L., Song, Y., Guo, Y., Wang, R., Gan, D., Shi, J. (2023). Progress in Pluronic F127 Derivatives for Application in Wound Healing and Repair. *International Journal of Nanomedicine*, 4485-4505.

Luo, Y. Y., Xiong, X. Y., Cheng, F., Gong, Y. C., Li, Z. L., Li, Y. P. (2017). The Targeting Properties of Folate-Conjugated Pluronic F127/Poly (Lactic-Co-Glycolic) Nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, *105*, 711-719.

Menon, J. U., Kona, S., Wadajkar, A. S., Desai, F., Vadla, A., Nguyen, K. T. (2012). Effects of Surfactants On The Properties of PLGA Nanoparticles. *Journal Of Biomedical Materials Research Part A*, *100*(8), 1998-2005.

Xiong, X., Tam, K., Gan, L. (2005). Release Kinetics of Hydrophobic and Hydrophilic Model Drugs from Pluronic F127/Poly (Lactic Acid) Nanoparticles. *Journal of Controlled Release*, *103*(1), 73-82.

Xiong, X., Tam, K., Gan, L. (2003). Synthesis and Aggregation Behavior of Pluronic F127/Poly (Lactic Acid) Block Copolymers in Aqueous Solutions. *Macromolecules*, *36*(26), 9979-9985.

AUTOMATIC DETECTION OF EMERGENCY HAND GESTURES IN THE CONTEXT OF VIOLENCE AND COERCIVE CONTROL USING YOLO POSE MODELS

FERHAT ERDOĞAN
Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilişim Sistemleri Mühendisliği
ferhaterdgn@hotmail.com

Assist. Prof. Dr. MUHAMMED KOTAN
Sakarya Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Bilişim Sistemleri Mühendisliği
mkotan@sakarya.edu.tr

Abstract
This study presents a comparative evaluation of YOLOv8-pose and YOLO11-pose architectures for automated detection of emergency hand gestures employed in violence and coercive control contexts. Both nano (n) and medium (m) model variants were examined to assess performance scalability under computational constraints. All models were trained on the Hand-Keypoints dataset utilizing 21-keypoint annotations and subsequently evaluated on a custom dataset comprising 160 video samples. Performance evaluation employed overall accuracy, Macro F1-score, and class-specific F1-scores. YOLO11m-pose demonstrated superior performance across all evaluation criteria, achieving 86.8% overall accuracy and a Macro F1-score of 0.884. Class-specific performance yielded F1-scores of 0.861 for "Signal for Help" and 0.908 for "Need Police" gestures. These results establish YOLO11m-pose as the optimal architecture among tested models for real-time emergency gesture recognition in violence intervention systems.

Keywords: Pose estimation, YOLO, Emergency hand gestures, Signal for Help

EVALUATION OF PROPERTIES OF DECELLULARIZED-CHICKEN SKIN WITH DIFFERENT METHODS

ŞEYMA NUR KANPALTA
Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoteknoloji
seymakanpalta@gmail.com

HATİCE Feyzan AY
Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Biyomühendislik
h.feyzanay@gmail.com

PhD. BETÜL MUTLU ÖZÇINAR
Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Biyomühendislik
betlmutl@gmail.com

Prof. Dr. RABİA ÇAKIR
Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Biyomühendislik
rabia.cakir@yildiz.edu.tr

Abstract
In recent years, decellularized extracellular matrices (dECMs) have gained significant attention in various tissue engineering applications due to their ability to support cell adhesion and proliferation, as well as providing a native-like microenvironment for tissue regeneration. Although dECMs derived from different tissues hold great potential for the regeneration of various tissues, the limited availability of tissue sources for decellularization has increased the interest in alternative sources. Chicken skin, which is often considered a waste material and is available in large quantities, has been previously reported in the literature to possess a high collagen content, making it an attractive candidate due to its accessibility and processability.In this study, chicken skin—a readily available and typically discarded tissue—was used as a source for dECM, and its structural properties following chemical and enzymatic decellularization were evaluated. DNA quantification results demonstrated that chemical decellularization with sodium dodecyl sulfate (SDS) yielded lower DNA content compared to enzymatic decellularization with trypsin. Collagen preservation, assessed by hydroxyproline content, was 82.9% in the SDS group and 53.62% in the trypsin group. Histological examinations were performed to evaluate the effectiveness of different decellularization protocols in preserving tissue architecture and removing cellular debris. H&E and Masson's trichrome staining revealed that tissue integrity and collagen structure were largely preserved in the SDS-treated protocols, while structural damage occurred in the trypsin-treated groups. DAPI staining indicated that cellular debris was removed more efficiently, with a decrease in fluorescent signal in tissues decellularized with SDS. These findings suggest that SDS-based protocols may be more effective than trypsin for decellularizing chicken skin. The high collagen content of decellularized chicken skin indicates its potential as a promising natural biomaterial, particularly for skin tissue engineering applications.

Keywords: Decellularization, chicken skin, tissue engineering, skin, sodium dodecyl sulfate

Acknowledgement: This study was supported by the Yıldız Technical University Scientific Research Projects Coordination Unit (BAP) (Project No: FBA-2024-6237).

OTFS CHANNEL ESTIMATION WITH MULTIPLE PILOT

THIERNO SADOU DIALLO
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
tsddonta22@gmail.com

Prof. Dr. Sultan Aldirmaz Colak
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
sultan.aldirmaz@kocaeli.edu.tr

Abstract
Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) is a waveform particularly well suited for very high-mobility communications and channels exhibiting large delays, unlike OFDM which tolerates high Doppler shifts poorly. In this paper, we propose an OTFS channel estimation method that uses a frame containing two pilots placed in a judicious manner so as to minimize their mutual interference. The method is compatible with both integer and fractional delay–Doppler values, and it exploits the separability of the Delay–Doppler Resource Element (DDRE) to estimate delay shifts, Doppler shifts, and the channel gain for each channel path separately when the paths are sufficiently resolvable, which depends on the delay and Doppler resolutions. To reduce complexity, the estimation focuses only on the region of the frame that contains the maximum energy (the location of the pilot, including its spreading). The estimates obtained from each pilot are then combined to reconstruct the delay–Doppler parameters. The obtained results show that the method achieves a lower normalized mean square estimation error (NMSE) than a single-pilot approach when the paths are sufficiently distinct. Moreover, the absence of large matrix inversions and the partial exploitation of the frame give the method significantly lower complexity compared to other existing OTFS estimators.

Keywords: Channel estimation, OTFS, 6G, Fractional delay-Doppler

ANTI-CANCER EFFECTIVENESS OF BIOCHANIN A-LOADED NANOCARRIERS FOR THE TREATMENT OF OVARIAN CANCER

HİLAL MEMİŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi, FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ, BİYOTEKNOLOJİ
hilalmemis73@gmail.com

Prof. Dr. RABİA ÇAKIR
Yıldız Teknik Üniversitesi, KİMYA-METALURJİ FAKÜLTESİ, BİYOMÜHENDİSLİK
rabia.cakir@yildiz.edu.tr

Abstract
As the eighth most common cancer in women, ovarian cancer is marked by high morbidity and mortality. It is considered the most lethal gynecologic cancer based on five-year survival. The key constraint in ovarian cancer therapy is acquired chemotherapy resistance, necessitating novel therapeutic agents to overcome multidrug resistance. Folic acid is a biomolecule that targets the folate receptor. Folate receptor overexpression on tumor cell surfaces confers a considerable advantage in cancer cells employing passive targeting. The natural polymer chitosan is widely adopted in nanocarrier systems for its biocompatibility and bioadhesion. In addition, PLGA nanocarriers are highly beneficial delivery systems, leveraging their biocompatibility and biodegradability for the efficient encapsulation of both hydrophilic and hydrophobic drugs. Biochanin A, chemically known as 4′-methoxy-5, 7-dihydroxy isoflavone, is an O-methylated isoflavonoid exhibiting estrogenic action, present in several plants including chickpeas, soybeans, peanuts, and red clover, and is commonly utilized in traditional Chinese medicine. Biochanin A isoflavone has anti-inflammatory, antioxidant, antimicrobial, neuroprotective, and hepatoprotective activities. This study will investigate at the effect of Biochanin A-loaded folic acid-chitosan coated PLGA nanoparticles on sensitive and PTX-resistant ovarian cancer cells. For this purpose, XTT cell viability test was performed to investigate the antiproliferative effect of Biochanin A compound on L929, A2780 sensitive and A2780/PTX resistant ovarian cancer cells and to determine the effective working concentration. Nanocarriers were created utilizing the nanoprecipitation process and coated with a folic acid-chitosan conjugate. UV-Vis Spectroscopy and FT-IR Analysis were used to validate the folic acid-chitosan conjugation. The size, size distribution and zeta potential of the synthesized nanocarriers were analyzed using the Zetasizer device. The encapsulation efficiency and drug loading capacity of the nanocarriers were also calculated using Liquid Chromatography-High Resolution Mass Spectrometry (Q-TOF-LC-MS). The synthesis and characterization of the nanoparticles have been successfully completed, and future studies will continue with in vitro experiments.

Keywords: Ovarian Cancer, Drug Delivery Systems, Anticancer Nanocarriers, PLGA, Biochanin A, Folic acid

Acknowledgements: This project was supported by TÜBİTAK 2210-C Domestic Priority Areas Master's Scholarship Program (Application number: 1649B022405138) and Yıldız Technical University BAP Coordination Office (Project number: FYL-2024-6419).

MOBILE APPLICATION FOR IRREGULAR WASTE COLLECTION

Lecturer ALİ TUNA DİNÇER
Kırklareli Üniversitesi, Lüleburgaz Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri
alitunadincer@gmail.com

Prof. Dr. MEHMET YILDIRIM
Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilişim Sistemleri Mühendisliği
myildirim@kocaeli.edu.tr

Abstract
In this study, a mobile-supported application has been developed that can be used for irregular waste collection services of local government waste collection units within the scope of smart cities. Irregular waste consists of waste such as construction rubble, vegetable oil waste, mineral oil waste, and vineyard-orchard waste, which are not periodically produced by citizens or businesses, but rather occur spontaneously and unexpectedly. Unless local governments notify them for collection, these wastes accumulate within the city and can cause environmental pollution. In the developed study, through a mobile application, citizens can report their irregular waste to local governments for collection, along with the notifier, waste location, waste type, amount, and visuals. Citizens can report either their location at the beginning of the waste or the location of waste located in a different location on the map. This enables the provision of a much faster, traceable, and effortless service than traditional phone- or petition-based notification processes. Google Maps API was used to process the notification locations and display them on the map. All notification data is saved in the database by the local government; This allows relevant personnel to access all notifications via both mobile and web-based applications. To increase efficiency during the collection process, waste locations must be navigated in the optimal order. Therefore, the application developed in this study utilizes genetic algorithms for route optimization. Notifications to be optimized via the panel are sent to the algorithm, which generates the shortest and most economical route between waste locations. A significant contribution of this study is that route optimization is calculated not only statically but also using real-time traffic data through Google Distance Matrix API integration. This saves time and fuel in busy city centers while also providing citizens with a modern service. In this respect, the study, developed within the context of smart cities, integrates a mobile notification system and AI-powered collection route optimization to create an innovative unregulated waste collection infrastructure.

Keywords: Smart Cities, Irregular Waste, Genetic Algorithm, RouteOptimization

PERFORMANCE IMPACT OF TEMPORAL FILTERING ON UWB POSITIONING SYSTEMS UNDER NLOS CONDITIONS

Engineer KAAN ERKAN
Trio Mobil, AR-GE, AR-GE
kaan.erkan@triomobil.com

NİYAZİ NADİ SÜMER
İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
niyazinadisumer@gmail.com

Engineer MURAT YILDIRIM
Trio Mobil, AR-GE, AR-GE
murat.yildirim@triomobil.com

Engineer MURAT ZENGİN
Trio Mobil, AR-GE, AR-GE
murat.zengin@triomobil.com

Prof. Dr. OĞUZHAN URHAN
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
urhano@kocaeli.edu.tr

Abstract
Ultra-Wideband (UWB) technology has emerged as a leading solution for positioning applications due to its high temporal resolution and robustness against multipath effects. However, in Non-Line-of-Sight (NLOS) scenarios where the direct line of sight between the transmitter and receiver is obstructed, UWB systems suffer from increased measurement errors and unstable position estimates, significantly degrading overall performance. This study investigates a temporal filtering-based approach to mitigate NLOS effects and enhance positioning accuracy under such challenging conditions. Two experimental setups were designed for evaluation: one in a static environment and one in a dynamic environment. In both scenarios, UWB-based range measurements were collected and analyzed. A Kalman filter was applied to improve the measurement data, and a state model was developed to capture the system's dynamic characteristics. Experimental results demonstrate that the Kalman-based temporal filtering method significantly improves positioning performance in both static and dynamic scenarios. In particular, under conditions where NLOS effects are pronounced, improvements in localization accuracy of 11% in dynamic scenarios and 35% in static scenarios were observed after filtering. These findings indicate that temporal filtering can serve as an effective enhancement tool for UWB-based positioning systems.

Keywords: Ultra Wide Band Positioning, NLOS, Kalman Filter

DESIGN OF A HIGH POWER DENSITY CONVERTER FOR MILITARY AVIATION SYSTEMS

ALTUG OZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
altugozkan1998@gmail.com

Prof. Dr. Atiye HULYA OBDAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
obdan@yildiz.edu.tr

Assistant PhD. ABDULKERIM GUNDOGAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
kerimg@yildiz.edu.tr

Abstract
Energy conversion in military aviation systems is critical for ensuring safe, stable and highly efficient operation. In this study, a DC-DC (direct current) converter that suitable for military aviation platforms and compliant with the MIL-STD-704 standard is designed. The primary objectives in the design process include achieving high power density, high efficiency, low voltage stress on switches, balanced thermal distribution, low output voltage ripples, simple circuit structure, ease of control and low cost. In line with these objectives, single-switch forward (SSF) and two-switch forward (TSF) converter topologies are compared under identical operating conditions. In the TSF converter, the maximum voltage stress on the switches is limited to approximately the input voltage (Vinput) whereas in the SSF converter, the maximum voltage stress can reach approximately 2.6xVinput. In the TSF converter, the energy stored in the transformer magnetizing inductance is reset through two clamping diodes so the requirement of additional reset winding or snubber network is eliminated. Voltage spikes caused by transformer leakage inductance are also clamped through these diodes. In addition, noises reduce, losses reduce and efficiency improve because of oscillations arising from leakage inductance are almost completely suppressed. The TSF converter provides a more suitable operating range for high input voltages and high output power levels while its structural simplicity facilitates implementation. Based on the comparison, the advantages of the TSF topology become clearly evident and it is observed that the TSF topology is a more suitable option than the SSF topology for military aviation applications. SSF and TSF converter structures with a 270 V DC input, 28 V DC output and 560 W output power were designed and simulated in MATLAB/Simulink. The results show that the designed converters provide the nominal output voltage defined in the MIL-STD-704 standard at the nominal input voltage specified in standard.

Keywords: DC-DC converter, single-switch forward converter, two-switch forward converter, high power density

MODEL PREDICTIVE CURRENT CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Assistant EZGİ TAŞKIN
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
ezgi.taskin@kocaeli.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. MEHMET ÖZDEMİR
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
mozdemir@firat.edu.tr

Abstract
Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are a popular choice for industrial and electric-vehicle applications because of their high efficiency and precise controllability. Recently, the adoption of Model Predictive Control (MPC) techniques in PMSM control has increased significantly.MPC is an approach that optimizes control signals by predicting the system's future dynamic behavior, and it has attracted considerable attention for its potential to deliver high performance, fast dynamic response, and stable control in PMSM drives. In PMSM-based systems, current control is one of the most critical components of high-performance drive design. Recently, Finite Control Set Model Predictive Control (FCS-MPC) has become a modern control method for PMSM current regulation. In this study, an FCS-MPC-based current control method for a PMSM is modeled and validated through MATLAB/Simulink simulations. Using a discrete-time dq-axis PMSM model, the stator currents are predicted for the whole candidate voltage vectors at each sampling instant, and the optimal switching state—i.e., the one with the minimum cost—is imposed directly. The results show that FCS-MPC can offer advantages in terms of fast response and low ripple. At the same time, computational delay, cost-function selection, and switching-frequency management remain critical design parameters.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Motor, Finite Control Set Model Predictive Control, Model Predictive Current Control, MATLAB/Simulink Simulation

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF SURFACE TREATMENTS APPLIED TO POLYMER-BASED MATERIALS ON THEIR WETTABILITY PROPERTIES

MEHMET DEMİRBAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, İmal Usulleri
mehmetdmrbs95@gmail.com

Assoc. Prof. Dr. BİNNUR SAĞBAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği
bzeybek@yildiz.edu.tr

Abstract
Polymer-based thin film materials are widely used in packaging, sensor interfaces, coating systems, and various technological applications that require flexible and easily formable films due to their low thickness, elasticity, and shaping capability. Although Polyethylene Terephthalate (PET) is commonly preferred in these applications, its inherently low surface energy limits adhesion with coatings and adhesives, making surface modification essential. This study comparatively evaluates the effects of corona and atmospheric plasma treatments on the wettability of PET surfaces. In the corona process, different line speeds and power levels were applied, and the influence of transferred energy density (P/v) on the contact angle was examined. Measurements conducted at 3–4 hours, 24 hours, and 48 hours after treatment showed that high-energy-density corona conditions provide a significant initial improvement in wettability and maintain this effect more consistently over time. In atmospheric plasma treatment, contact angle data reflected the surface modification only to a limited extent, which was attributed to the tendency of plasma-induced functional surface structures to weaken over short time scales. Therefore, the Arcotest surface energy method was employed to enable a faster and more immediate evaluation; results revealed that although surface energy increased at low line speeds, this improvement showed a tendency to diminish within a short period. This study systematically demonstrates which parameter combinations yield the highest effectiveness in corona treatment on PET surfaces, how this effectiveness evolves over time, and how post-process waiting periods influence surface performance. The findings provide a scientific basis for application-specific decisions between corona and plasma processes and offer a meaningful framework for selecting suitable processing conditions.

Keywords: Surface Modification, Corona Surface Treatment, Plasma Surface Treatment, Contact Angle, Surface Energy, Energy Density

IMPROVING DEEP HOLE DRILLING PERFORMANCE VIA CUTTING FLUID FORMULATION WITH EXTREME PRESSURE (EP) ADDITIVES

EZGİ ÖZDEMİR
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Polimer Bilimi ve Teknolojisi
ezgi.ozdemir.31@gmail.com

Assoc. Prof. Dr. MERVE DANDAN DOĞANCI
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Polimer Bilimi ve Teknolojisi
merve.doganci@kocaeli.edu.tr

Prof. Dr. ERDİNÇ DOĞANCI
Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü
edoganci@kocaeli.edu.tr

Abstract
Deep hole drilling is a challenging manufacturing process that demands high precision and bore quality, particularly in critical sectors such as the Defense and Aerospace Industries. The primary technical difficulties, including inadequate chip evacuation, high heat generation at the cutting edge, and reduced drill rigidity, significantly shorten tool life and decrease production efficiency. Considering the existing dependency on imported products, this study aims to develop a high-performance domestic deep hole drilling oil suitable for severe cutting operations to address these challenges. This lubricant is expected to play a crucial role in increasing production efficiency by overcoming process difficulties, accelerating chip removal, controlling temperature, and providing superior lubrication. The cutting fluid will be formulated using ester-based components to extend tool life and support surface quality. It will also incorporate special chemical additives, such as high concentrations of Extreme Pressure (EP) and anti-wear agents, to enhance performance. A high concentration of these additives is critical to maximize the oil's resistance against the extreme conditions of high temperature, pressure, and friction encountered in deep drilling operations. Another key feature of the developed product is its low-viscosity structure, which ensures rapid and effective chip cleaning and minimizes foaming caused by high pressure in small-diameter drilling. Furthermore, the formulation aims to provide environmental advantages by being free of chlorine and phosphorus derivatives and being biodegradable. The performance characteristics of the developed prototypes will be validated through comprehensive laboratory tests, adhering to international standards for criteria such as density determination, kinematic viscosity determination, flash point testing, and EP performance. The results are anticipated to demonstrate significant potential for contributing to the national economy and the Defense Industry through import substitution, increasing manufacturing yield, and reducing unit costs.

Keywords: Deep Hole Drilling Oil, Metalworking Fluids, Extreme Pressure (EP) Additives

ELECTROLYTIC HARD CHROME PLATING OF CRNIMO STEEL

BEKİR TUNCA
Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği/İmal Usulleri
bekir.95tunca@gmail.com

Assoc. Prof. Dr. TOLGA MERT
Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği
tmert@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. ALPTEKİN KISASÖZ
Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
akisasoz@yildiz.edu.tr

Abstract
The most fundamental challenge in the maintenance and upkeep of metallic materials operating in marine environments is ensuring sufficient resistance to corrosion. In this context, one of the most effective methods of corrosion protection is surface coating applications. Electrolytic hard chrome plating is widely preferred in marine applications due to its superior mechanical properties such as high hardness, excellent wear resistance, and low friction coefficient. In this study, the corrosion and tribological wear behavior of CrNiMo alloy steel continuously exposed to seawater on ships was investigated. The specimens were coated using the electrolytic hard chrome plating method to form a 150 µm thick chrome layer on the surface. Pin-on-disk tribological wear tests, surface roughness and microhardness measurements, and potentiodynamic polarization tests were performed to evaluate the mechanical and electrochemical performance of the coated specimens.

Keywords: Electrolytic Hard Chromium Plating, Corrosion, Potentiodynamic Polarization, Wear, Pin-on-Disk, Surface Roughness

AUTONOMOUS APPLICATIONS IN LOGISTICS: THE NEW ROUTE OF DIGITAL TRANSFORMATION

ÖZCAN BORA ÖZDEMİR
Duisburg-Essen Üniversitesi, Lojistik Mühendisliği, Lojistik Mühendisliği
oezcan.oezdemir@stud.uni-due.de

Lecturer HÜSNÜ BAYSAL
Kocaeli Üniversitesi, Hereke Asım Kocabıyık MYO, Makine Programı
hbaysal@kocaeli.edu.tr

Assist. Prof. Dr. NECMİ CEMAL ÖZDEMİR
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
necmi.ozdemir@kocaeli.edu.tr

Abstract
The logistics industry is currently undergoing a rapid digital transformation driven by swift advancements in autonomous vehicle technology. The future of logistics is being shaped by studies related to technological innovations; robots are taking on a more active role in warehouses, drones are delivering packages, and driverless trucks are transporting goods between cities. With these developments, companies aim to reduce labor costs and increase efficiency. However, this digital transformation is not just about reducing costs or boosting efficiency—it is also about redesigning how goods are moved from one place to another in a world where customers expect speed, sustainability, and reliability. In this context, this article examines how autonomous vehicles are transforming logistics, the challenges they face, and what the future of autonomous technologies will be.

Keywords: Autonomous Vehicles, Autonomous Robots, Autonomous Drons, Autonomous Trucks

FIRE SAFETY ISSUES RELATED TO LITHIUM-ION BATTERY ELECTRIC VEHICLES IN INDOOR PARKING LOTS

ÖZCAN BORA ÖZDEMİR
Duisburg-Essen Üniversitesi, Lojistik Mühendisliği, Lojistik Mühendisliği
oezcan.oezdemir@stud.uni-due.de

Lecturer HÜSNÜ BAYSAL
Kocaeli Üniversitesi, Hereke Asım Kocabıyık MYO, Makine Programı
hbaysal@kocaeli.edu.tr

Assist. Prof. Dr. NECMİ CEMAL ÖZDEMİR
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
necmi.ozdemir@kocaeli.edu.tr

Abstract
It has been observed that the demand for electric vehicles with lithium-ion batteries continues to increase worldwide. With the global deployment of Electric Vehicles (EVs), it is also anticipated that the likelihood of involvement in fire incidents in enclosed parking lots will probably increase. As a result, lithium-ion batteries may be damaged, which can pose safety threats to the passengers in the electric vehicle exposed to fire, other vehicles in enclosed parking lots, responders to the fire, and those involved in post-fire operations. In this context, for the safety of Electric Vehicles (EVs) and their passengers, lithium-ion batteries need to be used safely, and their cells must be maintained within a specified voltage and temperature range. Taking these into consideration, this article addresses the fire risks associated with lithium-ion battery electric vehicles in enclosed parking lots.

Keywords: Lithium-Ion Batteries, Electric Vehicles, Fire Risks, Fire Safety, Indoor Area, Parking Garage, Vehicle Fire

DESIGN, PRODUCTION AND EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF BELLOWS AND TWISTING PNEUMATIC ARTIFICIAL MUSCLES

SENA ÖZEL
Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
sena.efendioglu@ogr.sakarya.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. SEDAT İRİÇ
Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
siric@sakarya.edu.tr

Prof. Dr. AKIN OĞUZ KAPTI
Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
aokapti@sakarya.edu.tr

Lecturer DERYA İRİÇ
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Arifiye Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar Ve Ulaşım Teknolojileri Bölümü
diric@subu.edu.tr

Assistant MUHAMMED ÖMER İBİŞ
Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
omeribis@sakarya.edu.tr

Assistant SEYDA EMİR ŞİMŞİR
Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
simsir@sakarya.edu.tr

Abstract
Pneumatic artificial muscles (PAMs) developed for use in soft robotic systems have recently become a major research focus due to their lightweight structure, high compliance, and inherent safety in human–machine interaction. Among these, twisting and bellows-type pneumatic actuators show great potential for applications such as biomimetic manipulators, grippers, and joint modules. However, the performance of such actuators strongly depends on several factors, including geometric design parameters, material properties, and the repeatability of the fabrication process. This study aims to design two geometric variations of both bellows-type and twisting pneumatic muscles, fabricate them using three different elastomer materials with varying hardness levels, and experimentally compare their force and torque outputs. Two bellows-type and two twisting actuator designs were created, each manufactured using materials of 20 Shore, 20 Shore platinum, and 40 Shore hardness. Dedicated mold sets were designed for each geometry, and a single-piece casting process was employed for fabrication. A custom experimental setup—comprising a load cell, torque sensor, pressure control unit, and motion measurement system—was developed for mechanical performance evaluation. The actuators were tested across specific pressure ranges, and their displacement, axial force, and twisting torque outputs were recorded. The results revealed that both material stiffness and geometric configuration play decisive roles in actuator performance. The 20

Shore material provided a wider operational range due to its high deformability but yielded lower maximum force. Conversely, actuators produced with 40 Shore material generated higher force and torque, albeit with reduced deformation and slower response. In twisting actuators, increasing the number of twists enhanced torque generation, while in bellows-type actuators, increasing the number of bellows segments directly improved axial force output. Overall, the study demonstrates that the performance of pneumatic artificial muscles is significantly influenced by both geometric parameters and elastomer hardness. The unique contribution of this work lies in the systematic fabrication and experimental comparison of identical actuator geometries across three different Shore hardness levels, in terms of both torque and force. The findings provide valuable insights for optimizing material–design interactions in soft robotic actuator development.

Keywords: Soft Robotics, Pneumatic Artificial Muscle, Twisting Actuator, Bellows-Type Actuator

BIOMECHANICAL EVALUATION OF CERVICAL DISC HEIGHT REDUCTION ON SEGMENTAL STABILITY: A FINITE ELEMENT ANALYSIS

AYBERK DİZDAR
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal Mühendisliği
aybrkdzdr@gmail.com

Assoc. Prof. Dr. TALİP ÇELİK
Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği
talip.celik@kocaeli.edu.tr

Prof. Dr. ARİF ÖZKAN
Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği
arif.ozkan@kocaeli.edu.tr

Abstract
The aim of this study is to investigate the effects of intervertebral disc height loss on the mechanical strain of the facet capsular ligament in the cervical spine using three-dimensional finite element analysis (FEA). An idealized cervical spine model including the C4–C5–C6 segments was constructed. The C5–C6 intervertebral disc height was reconstructed in three conditions—normal, 25% reduced, and 50% reduced—based on degeneration patterns reported in the literature. The inferior surface of C6 was fixed, while physiological flexion and extension motions were applied to the C4 vertebra. Contact was defined between the facet articular surfaces, and the facet capsular ligament was modeled using anatomically extracted contours. The results demonstrated that disc height reduction substantially altered the segmental kinematics and significantly increased the tensile strain on the facet capsular ligament, particularly during flexion. In the normal disc condition, the maximum principal strain reached 18.4%, whereas this value increased to 28.7% with 25% disc height loss and further to 42.1% with 50% loss. These values fall within the injury threshold range (35–45%) reported in the literature for the capsular ligament. Although strain increases during extension were more limited, severe disc height reduction still resulted in a notable decrease in ligament load-bearing capacity. In conclusion, the reduction of intervertebral disc height markedly elevates mechanical strain on the facet capsular ligament in cervical segments, suggesting an increased risk of soft tissue injury in degenerative cervical spines. These findings highlight the biomechanical importance of disc integrity in maintaining normal cervical stability and may contribute to the understanding of pain mechanisms in degenerative neck conditions.

Keywords: Cervical spine, Finite element analysis, Biomechanical modeling

INVESTIGATION ON SHAPE DEPENDENT JOINTS

SEMİH ÖZKAN AKDOĞAN
İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği
ozkanakdogan@outlook.com

YUSUF CAN AKTAY
İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği
yusufcanaktay@outlook.com

FEVZİ DENİZ YENİGÜN
İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği
fevzi.deniz5334@gmail.com

Engineer ERGİN METİN
İskenderun Teknik Üniversitesi, Çamaşır Makinası Fabrikası, ARGE Merkezi
ergin.metin@beko.com

Prof. Dr. ATA MUĞAN
İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği
atamugan@gmail.com

Abstract
This study investigates form-based sheet metal joining methods and their alternatives. Analyses were performed in the ABAQUS program using numerical methods on the form spot welding method, which is achieved through plastic deformation. In recent years, the form spot welding method has been preferred over other form-based joining methods in various industries because it provides a connection without requiring additional material. There is a need for further research on the theory of this increasingly popular method. It is important to determine the parameters that fundamentally affect product quality. For this reason, this study examined the effects of mold geometries, the friction coefficient between sheet metals, and sheet thicknesses on the process. Material models and damage models used in finite element analyses involving plastic deformation were examined, and experimental designs were created using finite element analyses based on a prepared parametric model. The number of analyses required to rank the mold geometry parameters affecting the process using the Taguchi method was determined. The form punch process was simulated together with the plastic material behavior using dynamic-explicit finite element analyses. The parameters examined in the numerical models included material type, flange thickness, flange height, tool type and geometry, tool-part interface interaction, and environmental conditions. Eleven parameters were examined: punch diameter, punch corner radius, punch wall angle, die width, die inner width, die inner radius, die depth, die wall angle, die channel radius, die outer radius, and die channel slope angle. The “arbitrary Lagrangian Eulerian” (ALE) method was used in the analyses. Damage control was performed in areas with a high probability of damage occurring on the punch region. The Cowper-Symonds material model and the Cockcroft-Latham damage criterion were used for damage control. The effects of the friction coefficient, mold geometry, and sheet thickness on damage formation were determined. Based on the findings obtained from the analyses, the strength of the spot weld connection between the washing machine

body sheet and the spring suspension bracket was examined using the finite element method with the appropriate spot weld geometry. The economic effects of process improvement were examined based on washing machines produced in Turkey.

Keywords: Finite element methods, shape dependent joints, metal forming

INVESTIGATION OF THE CORROSION PROPERTIES OF HIGH-TEMPERATURE NITRIDED DUPLEX STAINLESS STEEL

ALEV ORAL
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik fakültesi, Metalurji ve malzeme mühendisliği
alev.oralkou@gmail.com.tr

Assistant PhD. ÖZGE ARARAT
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik fakültesi, Metalurji ve malzeme mühendisliği
ozge.ararat@kocaeli.edu.tr

Abstract
Duplex stainless steels, which consist of both ferrite and austenite phases, are characterized by their high strength, excellent corrosion resistance, and good weldability. These attributes enable their widespread application in industries such as the chemical, petrochemical, nuclear, and marine sectors. The high-temperature solution nitriding treatment, which significantly differs from the conventional surface hardening method of nitriding, involves the diffusion of nitrogen from the surface to the center, thereby stabilizing the austenite phase. The dissolution of nitrogen on the metal surface facilitates the formation of a thicker, more protective passive film through the action of nitrate ions. Numerous studies have demonstrated that the incorporation of nitrogen enhances the stability of the passive film, thereby increasing resistance to pitting corrosion, crevice corrosion, intergranular corrosion, and stress corrosion. This study investigates the effect of high-temperature solution nitriding on the corrosion resistance of Fe-20Cr-14Mn-2Ni-3Mo duplex stainless steel. The phase transformation from the surface to the center of the duplex stainless steel was analyzed. Microstructural characterization was carried out using light microscopy, while changes in corrosion properties were assessed through immersion testing.

Keywords: Duplex stainless steel, microstructural characterization, high-temperature solution nitriding, corrosion

INVESTIGATION OF THE BAINITIC TRANSFORMATION IN 100CR6 BEARING STEEL

İREM AKIN
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik fakültesi, Metalurji ve malzeme mühendisliği
iremakin2010@gmail.com.tr

Assistant PhD. ÖZGE ARARAT
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik fakültesi, Metalurji ve malzeme mühendisliği
ozge.ararat@kocaeli.edu.tr

Abstract
High-carbon, high-chromium bearing steels are commonly used in applications where high hardness, wear resistance, and fatigue strength are required under service conditions. During the production of bearing steels, they undergo processes such as spheroidizing annealing, hardening, and tempering. After spheroidizing annealing, the microstructure consists of a ferritic matrix and coarse carbides. Therefore, a hardening treatment is applied following spheroidizing annealing. Hardening, applied at approximately 850 °C within the austenite + ferrite phase field, promotes the dissolution of some of the coarse carbides. This is followed by rapid cooling to induce martensitic transformation. After the hardening process, the final microstructure consists of a martensitic matrix with finer carbides. The presence of carbides in the microstructure contributes to high hardness. However, carbides exist as a secondary phase in the matrix and have physical properties that differ significantly from those of the matrix. This results in poor interfacial coherence between the carbides and the matrix, which negatively affects fatigue resistance. Studies have suggested that a bainitic microstructure would exhibit higher fatigue resistance. In this study, bainitic transformation in bearing steel was investigated. The hardening process was applied in the full austenitization region of 100Cr6 bearing steel, followed by isothermal annealing to achieve bainitic transformation.

Keywords: Bearing steels, martensite, isothermal treatment, bainite

PRODUCTION OF POLYVINYL ALCOHOL NANOFIBERS CONTAINING TETRABUTYLAMMONIUM TETRAFLUOROBORATE BY USING THE ELECTROSPINNING METHOD

HELİN DAĞ
Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli Meslek Yüksek Okulu, Kimya ve Kimyasal işleme teknolojileri
helin.dagg59@gmail.com

Assoc. Prof. Dr. MERVE DANDAN DOĞANCI
Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli Meslek Yüksekokulu, Kimya ve kimyasal İşleme teknolojileri
merve.doganci@kocaeli.edu.tr

Prof. Dr. ERDİNÇ DOĞANCI
Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli Meslek Yüksekokulu, Kimya ve kimyasal işleme teknolojileri
edoganci@kocaeli.edu.tr

EZGİ ÖZDEMİR
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Polimer bilimi ve teknolojisi
ezgi.ozdemir.31@gmail.com

SENA ÖZDİL ŞENER
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal mühendisliği
senaozdil@gmail.com

Abstract
Electrospinning is one of the most common methods for nanomaterial production, especially for nanofibers. Electrospun polymeric nanofibrous membranes have attracted great attention in biomedical applications such as wound dressing, drug delivery, and even medical implants. [1] In studies, properties such as antibacterial activity can be added to the nanofibers obtained by using many additives. [2] Tetrabutylammonium tetrafluoroborate (TBATFB) is an inorganic salt used in organic synthesis reactions and electrochemical applications; it serves as a catalyst or reagent. Polyvinyl alcohol (PVA) is a highly hydrophilic, water-soluble, biodegradable and biocompatible polymer due to the large number of hydroxyl groups in its polymer chains and is preferred as a suitable matrix material for nanofiber production. [3] In this study, it was aimed to produce poly(vinyl alcohol) (PVA) nanofibers containing TBATFB, a quaternary ammonium salt, by electrospinning. The effects of different additive amounts on nanofiber morphology were evaluated by adding 0.05%, 1%, 3%, and 5% salt. SEM results compared to the control sample revealed a slight decrease in fiber pilling and a more regular morphology in the 0.05% salt sample. In contrast, irregularities and occasional morphological distortions occurred in the 5% salt sample. The primary objective of this study was to determine the effects of TBATFB on the structural, morphological, and functional properties of PVA-based nanofibers and to demonstrate performance changes depending on the additive amount. Based on the obtained results, the fibers will be evaluated for use as supporting materials in organic synthesis and electrochemical processes.

Keywords: Tetrabutylammonium Tetrafluoroborate, Polyvinyl alcohol, Electrospinning, nanofiber

Acknowledgements: This work is supported by the "TÜBİTAK 2209-B University Student Research Projects Support Program under Application No. 1139B412401192

1. Leung, V. and F. Ko, 2011. 22(3): 350.
2. Şener, S.Ö., et al., Journal of Applied Polymer Science, 2024: e56139.
3. Park, J.-C., et al. Polymer journal, 2010. 42(3): 273.

HAZARDS AND RISKS WITHIN THE SCOPE OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY IN AIRPORT GROUND SERVICES: THE CASE OF GÖKÇEADA AIRPORT

EMRE KESGÜN
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ, İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ
emrekesgunn@gmail.com

Prof. Dr. SARP KORKUT SÜMER
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ, İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ
sarpksumer@comu.edu.tr

Abstract
The aviation industry with its dynamic structure and complex operations, harbors significant occupational health and safety risks. This study addresses the critical importance of occupational health and safety, an integral part of airports, through a detailed application specific to Gökçeada Airport. In the study, physical, chemical, biological, ergonomic, and psychological risk factors encountered in the airport's ground handling units were identified, and preventive measures to maximize employee health and safety were developed. The working environments of Gökçeada Airport's apron, electrical, mechanical, ARFF (Aircraft Rescue and Firefighting), air traffic control, office, and terminal electronics units were examined in detail, and the hazards and risks exposed to the personnel in these units were classified by considering the work environments and conditions. The findings demonstrated that implementing proactive OHS strategies is a vital necessity in work environments with high-risk profiles such as airports.

Keywords: Gökçeada Airports, Risk Assesment, Hazard Analysis, Aviation

ADVANCED POLYMER-BASED HYDROGEL/NANOFIBER COMPOSITE WOUND DRESSING FOR BURN TREATMENT WITH PLANT EXTRACT INTEGRATION

Takva DARVISH[1], Merve DANDAN DOĞANCI[1,2], Erdinç DOĞANCI[2]
[1]Kocaeli University, Institute of Science, Polymer Science and Technology, 41001, Kocaeli, Türkiye.
[2]Kocaeli University, Department of Chemistry and Chemical Processing Technologies, 41140, Kocaeli, Türkiye.

Abstract
In the treatment of burn wounds, modern wound dressings are expected to possess multifunctional bioactive properties such as reducing the risk of infection, maintaining moisture balance, supporting cell proliferation, and accelerating tissue regeneration. In this context, this study aims to develop a multifunctional composite structure by combining a poly(lactic acid)/poly(ethylene glycol) (PLA/PEG)-based nanofiber layer produced via electrospinning with an alginate-based hydrogel system. For nanofiber fabrication, a solution containing 10% PLA, 20% PEG, and 0.2% glutaraldehyde was used, and 3% tea tree oil was incorporated to enhance the antibacterial and anti-inflammatory properties of the nanofibers. Initial characterization of the nanofiber layer was carried out, and its morphological structure was analyzed through SEM analysis. In the preliminary studies conducted for the hydrogel layer, alginate gels were evaluated in terms of gelation behavior, homogeneity, integrity, and stability. Black cumin oil (Nigella sativa) was selected as a bioactive additive to be incorporated into the hydrogel system in the subsequent stages. It is planned that the black cumin oil will be added to the hydrogel phase to enhance antioxidant and antimicrobial activity, followed by optimization of the nanofiber–hydrogel interface to form the composite wound dressing.

This composite design is intended to integrate the high surface area, gas permeability, and mechanical support provided by the nanofiber structure with the moisture retention capacity, biocompatibility, and antioxidant–antimicrobial effects imparted by the plant-based extract within the hydrogel phase. The final structure is expected to serve as a potential biomaterial not only for burn wounds but also for complex wound types such as diabetic and acute wounds. The composite structure is characterized through FTIR, DSC, TGA, mechanical tests, swelling–dehydration behavior, porosity measurements, cytotoxicity testing, and antibacterial activity analyses.

1. Ilomuanya, M.O., Okafor, P.S., Amajuoyi, J.N. *et al.* Polylactic acid-based electrospun fiber and hyaluronic acid-valsartan hydrogel scaffold for chronic wound healing. *Beni-Suef Univ J Basic Appl Sci* 9, 31 (2020).

2. Malektaj, H.; Drozdov, A.D.; deClaville Christiansen, J. Swelling of Homogeneous Alginate Gels with Multi-Stimuli Sensitivity. *Int. J. Mol. Sci.* 2023, *24*, 5064.

Keywords: Nanofiber, Hydrogel, PLA, Alginate, Burn Treatment, Composite Wound Dressing

THE EFFECTS OF INDUSTRY 4.0 AND SMART MANUFACTURING ON PRODUCTION PROCESSES: A CASE STUDY FROM THE PACKAGING INDUSTRY

YEKTA ALPER ÖRÜN
Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği
yektaalper@hotmail.com

Prof. Dr. ANIL AKDOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Makine Mühendisliği
Nomak@yildiz.edu.tr

Abstract
This study aims to digitalize and automate the post-cutting quality control process in flexible packaging production by using sensor data. In many facilities today, quality control steps are still carried out manually, which increases the risk of human error and negatively affects production efficiency. Especially in high-volume production lines, delayed detection of a quality issue can raise costs and lead to customer complaints. Therefore, the developed system analyzes data collected from temperature, tension, speed, measurement, and vibration sensors on the cutting line to detect quality deviations and automatically directs suspicious products to the control process through an auto-block mechanism. The foundation of the study was built on a detailed analysis of the company's previous customer complaints. These analyses identified errors that could be associated with sensor data, aiming to systematically prevent similar issues. Statistical process control methods were applied to the collected data, process behaviors were evaluated using control charts, and Cp-Cpk process capability analyses were performed to assess quality capability. Statistical threshold values were defined for critical sensor parameters, and any data exceeding these limits were automatically flagged by the system. Thus, the quality control process became manageable in real time and data-driven, without the need for manual intervention. One of the system's key features is its two-way integration with SAP (Systemanalyse Programmentwicklung). This integration not only enables an early warning mechanism but also ensures that all quality control steps can be monitored and managed through a central platform. Products flagged by the system are subjected to physical testing by the quality team. Conforming products are reintegrated into production, while defective ones are sent for reprocessing or disposal. Under real production conditions, the system's performance was evaluated based on criteria such as the accuracy rate of blocked products, inspection time, and the reduction of unnecessary manual controls. Results demonstrated that the system significantly improved speed and accuracy in quality control processes. These improvements have translated into fewer customer complaints, enhanced process efficiency, and stronger traceability across the production line.

Keywords: Quality control, sensor data analysis, cutting process, statistical process control (SPC), process capability analysis

AN EXAMINATION OF THE EFFECT OF PUZZLE-BASED LEARNING ACTIVITIES ON SEVENTH GRADE STUDENTS' MATHEMATICAL REASONING AND SELF-EFFICACY SKILLS

ABDULLAHÇINAR
Kocaeli Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, İlköğretim Matematik Öğretmenliği
abdullahcinar0364@gmail.com

Abstract
The purpose of this study is to examine the effect of the puzzle-based learning approach on the reasoning skills and mathematics self-efficacy levels of 7th grade middle school students in mathematics. The study was conducted with 20 seventh-grade students attending Tasvire Hurşit Güneş Middle School in Kandıra district, Kocaeli province, during the 2025-2026 academic year. Designed according to a quasi-experimental design, the study involved a total of 6 hours of puzzle-based mathematics activities over 6 weeks, with one lesson hour per week. The 24-item Mathematics Reasoning Test (MMT) developed by Soylu (2015) and the 14-item Mathematics Self-Efficacy Scale (MÖÖ) developed by Umay (2001) were used as data collection tools. Both measurement tools were administered to the students as a pre-test before the application and a post-test after the application. The data obtained were analyzed using the SPSS 26.0 software package. The Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests were used to examine whether the data were normally distributed, and the dependent groups t-test was applied for data that were normally distributed. According to the research findings, the 6-week puzzle-based learning activities were found to have a statistically significant effect on students' mathematical reasoning skills and mathematical self-efficacy levels ($p<0.05$). In conclusion, it can be said that the puzzle-based learning approach is an effective method for developing students' reasoning and mathematical self-efficacy skills in middle school mathematics courses.

Keywords: Puzzle-based learning, mathematical reasoning, mathematical self-efficacy

PRODUCTION OF UNIFORM AND DUAL-GRADE LIDINOID STRUCTURES USING PRINT-PAUSE-PRINT TECHNOLOGY AND COMPRESSION MECHANICAL PROPERTIES

ABDULFETTAN NASIR
Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği
abdulfettannasir@gmail.com

Assoc. Prof. Dr. ABDURRAHİM TEMİZ
Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
abdurrahimtemiz@karabuk.edu.tr

Abstract
This study focuses on the production of homogeneous and dual-grade TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) lidinoid structures using the print-pause-print technology and the compression testing of these structures. TPMS structures offer significant advantages in various applications due to their mechanical, thermal, and electrical properties. The study investigates the design of TPMS lidinoid structures, manufacturing processes, and the feasibility of applying the print-pause-print method. The print-pause-print technology allows for precise layer-by-layer production of structures by pausing the 3D printing process at specific intervals, ensuring high precision in the placement of internal structures. This method presents an important innovation, particularly for the production of dual-grade and complex geometries of TPMS structures. The paper discusses the technical challenges encountered during the production of these structures, and the properties of the materials. Additionally, the results of compression tests on the mechanical strength, flexibility, and load-bearing capacities of TPMS lidinoid structures are presented, and how these structures can be used more efficiently in industrial applications is discussed. The study highlights the role of print-pause-print technology in the production of complex geometries and analyzes the physical performance of structures produced using this method, pointing to potential new application areas for future manufacturing processes. This research demonstrates how the integration of 3D printing technologies with TPMS structures offers an effective solution, especially for the efficient production of structures requiring functional load-bearing capacity.

Keywords: Additive manufacturing, mechanical properties, functionally graded materials.

Acknowledgements: This study was carried out within the scope of the project numbered KBÜBAP-25-YL-085 supported by Karabük University Scientific Research Projects (KBÜBAP). I would like to thank Karabük University for their support.

INDUSTRIAL NOISE AND ITS IMPACT ON THE CITY IN KOCAELI

Lecturer PhD. ALİ İHSAN ENGÜR
Kocaeli Üniversitesi, Gölcük MYO, Makine
ali.engur@kocaeli.edu.tr

Abstract
Kocaeli is a city that has grown with some of Turkey's most powerful industrial facilities, and it is characterized as Turkey's industrial capital, where many industrial plants are located within the city. Looking at the industrial establishments in the province, there is Tüpraş, considered Turkey's largest industrial enterprise; giants of the tire sector such as Bridgestone, Lassa, Pirelli, and Goodyear; Enerjisa, started by the Sabancı Group; Kordsa; automotive companies like Ford and Hyundai; and alongside these industrial enterprises, large-scale factories such as Çolakoğlu Metallurgy, Şişe Cam, Aygaz, Sarkuysan, Yıldız Entegre, Hayat Kimya, Assan Aluminum, İpragaz, İGSAŞ, Nuh Cement, DYO, Polisan, and İzocam. Thus, it is one of the country's densely industrialized cities, and environmental noise is particularly high in port, logistics, and organized industrial zones. In this study, industrial noise is examined not only in terms of factory locations but also by considering the noise generated by the logistics network of these factories.

Keywords: Noise, Kocaeli, Industry, Manufacturing

THE IMPACT OF CHATGPT ON BUSINESSES AND ITS CONTRIBUTIONS TO ORGANIZATIONAL PERFORMANCE

YASEMİN DERETAM
Kocaeli Üniversitesi, MÜHENDİSLİK, ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ
yaseminderetam@gmail.com

Assist. Prof. Dr. PINAR YILDIZ KUMRU
Kocaeli Üniversitesi, MÜHENDİSLİK, ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ
pinarki@kocaeli.edu.tr

Abstract
Artificial intelligence–based systems have the potential to elevate firms' performance to higher levels. These technologies enhance operational workflows by increasing speed and efficiency. For instance, AI solutions such as ChatGPT reduce repetitive and time-consuming tasks, enabling employees to focus on more creative and strategic activities. Additionally, such technologies lower operational costs and allow companies to utilize their resources more effectively. Artificial intelligence also provides innovative solutions in areas such as customer service, enhancing customer satisfaction and strengthening loyalty. Data analytics and forecasting methods accelerate strategic decision-making processes and, when implemented properly, offer firms a significant competitive advantage. However, issues such as data security, privacy, and ethics must be addressed with great care. When implemented with the right strategies, AI-supported systems offer companies sustainable success and play an important role in achieving long-term growth objectives. While these technologies support innovative methods, they also contribute to shaping the future of the business world.

Keywords: Business Performance, Cost Reduction, Strategic Decision-Making, Efficiency, Artificial Intelligence

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF BORON NITRATE AND TITANIUM DIOXIDE DOPED SULFONATED POLY VINYL ALCOHOL BASED COMPOSITE MEMBRANES IN DIRECT BOROHYDRIDE FUEL CELLS

NURGÜL MUTLU
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Polimer Bilimi ve Teknolojisi
Nurgulincimutlu@outlook.com

EMRE AYDIN
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Polimer Bilimi ve Teknolojisi
shakespeareaq@gmail.com

Assoc. Prof. Dr. MERVE DANDAN DOĞANCI
Kocaeli Üniversitesi, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri, kimya ve KİmyasaI İşleme Teknolojileri
merve.doganci@kocaeli.edu.tr

Prof. Dr. ERDINÇ DOĞANCI
Kocaeli Üniversitesi, Kimya ve KİmyasaI İşleme Teknolojileri, KLimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri
edoganci@kocaeli.edu.tr

Prof. Dr. CENK ÇELİK
Kocaeli Üniversitesi, Muhendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği
cenkcelik@kocaeli.edu.tr

Abstract
The increasing global energy demand and environmental problems have accelerated efforts towards sustainable and clean energy solutions. Direct Borohydride Fuel Cells (DBFCs) stand out as a promising energy source due to their high energy density and environmentally friendly properties. However, the performance and commercial viability of DBFCs largely depend on the characteristics of the membranes used [1].

Commonly used Nafion membranes have disadvantages such as high cost, limited chemical stability, and fuel permeability. Therefore, the search for alternative membranes has gained importance [2].

This study aims to investigate the effect of boron nitride (BN) and titanium dioxide (TiO2) additives on enhancing the performance of sulfonated poly(vinyl alcohol) (SPVA) membranes for use in DBFCs. Proposed as an alternative to the disadvantages of commercially prevalent Nafion membranes (such as high cost, fuel permeability, and chemical instability), the BN/TiO2/SPVA membranes potentially offer low cost and structures with greater mechanical and thermal stability [3].

In this study, TiO_2/SPVA composite membranes containing BN at different ratios (3%, 5%, and 7% by weight) were prepared using the electrospinning method. The resulting membranes were subjected to tests including H-NMR, FT-IR, TGA and DSC, mechanical tests, water uptake measurements, ionic conductivity, and borohydride permeability measurements.

The anticipated results aim to provide scientific and practical contributions to fuel cell membrane technologies and energy sustainability by developing high-performance, low-cost, and domestically produced DBFC membranes.

Acknowledgement: This study is supported by the Kocaeli University Scientific Research Projects Coordination Unit under the General Research Project, project number FBA-2025-4345.

Keywords: Direct Borohydride Fuel Cell, Polysulfone, Boron Nitrate, Composite Membrane, Alternative Energy Technologies

REFERENCES

1. Ng, W. W., San Thiam, H., Pang, Y. L., Lim, Y. S., & Wong, J. (2023). Facile synthesis of nafion based self-healable proton exchange membranes for direct methanol fuel cells. Materials Today: Proceedings.
2. Vinothkannan, M., Ramakrishnan, S., Kim, A. R., Lee, H. K., & Yoo, D. J. (2020). Ceria stabilized by titanium carbide as a sustainable filler in the nafion matrix improves the mechanical integrity, electrochemical durability, and hydrogen impermeability of proton-exchange membrane fuel cells: effects of the filler content. ACS applied materials & interfaces, 12(5), 5704-5716.
3. Roshanravan, B., Younesi, H., Abdollahi, M., Rahimnejad, M., & Pyo, S. H. (2022). Incorporating sulfonated MIL-100 (Fe) in sulfonated polysulfone for enhancing microbial fuel cell performance. Fuel, 312, 122962.

DEEP LEARNING MODELS FOR EEG-BASED EMOTION RECOGNITION: BINARY CLASSIFICATION OF VALENCE AND AROUSAL DIMENSIONS

FATMA BUSE BORLU
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği
fatmabuseborlu@gmail.com

Abstract
Emotion recognition is gaining increasing significance in fields such as human–computer interaction and neuroscience. EEG signals are widely utilized for the analysis of emotional states as they directly reflect the brain's electrical activity. However, the noisy, high-dimensional, and inter-individually variable nature of EEG signals poses significant challenges for signal processing. In this study, the EEG-based emotion recognition problem is investigated separately for valence and arousal dimensions using the widely adopted DREAMER dataset. Raw EEG signals were preprocessed using a 1-45 Hz band-pass filter, segmented into 4 second windows with a 2 second overlap, and normalized via channel-wise z-score normalization. Class imbalance was addressed through a multi-faceted approach: oversampling was applied at the data level, while class weights and the Focal Loss function were integrated during the model training phase. Three deep learning architectures were evaluated: a CNN model to extract spatial features, a BiLSTM model to capture temporal dependencies, and a hybrid CNN+BiLSTM model combining both structures. Each model was trained independently three times for both valence and arousal tasks, and mean accuracy values were obtained. The hybrid model achieved the highest accuracy for valence classification (75.46% ± 0.32%), whereas the BiLSTM model yielded the best performance for arousal classification (77.55% ± 1.59%). Although the CNN model demonstrated strong performance in the arousal task, it produced lower accuracy in the valence task. The results indicate that hybrid architectures exhibit more stable and superior performance compared to individual models, particularly in valence classification.

Keywords: EEG, Emotion Recognition, CNN, BiLSTM, Hybrid.

INVESTIGATION OF DISCONTINUITY CONTROLLED FAILURE MECHANISMS IN ABANDONED QUARRY SLOPES

TAYFUN GÜL
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
tayfungl614@gmail.com

Assoc. Prof. Dr. ÖZKAN CORUK
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
coruk@kocaeli.edu.tr

Abstract
The orientation and distribution of discontinuity planes in rock slopes are fundamental parameters that determine slope stability conditions and potential failure mechanisms. In discontinuity controlled slope investigations, these parameters are examined using a kinematic analysis method, taking into account the slope dip and dip direction. Risks associated with discontinuity planes are evaluated using stereographic projections. This method provides a practical approach for obtaining the necessary data in the preliminary design of slopes and for identifying potential risks. Within the scope of this study, the effectiveness of the kinematic analysis method was investigated in abandoned quarry slopes. Four rock slopes, located in the western section of the Kartal Quarry in Istanbul, with orientations of 85°/175°, 87°/075°, 88°/020°, and 65°/055°, were analyzed. Potential sliding surfaces corresponding to different failure mechanisms of the slopes were identified, and the probabilities of planar, wedge, and toppling failures were calculated. In the analyses, the risks of planar sliding (6.7%-56.7%) and wedge sliding (14.3%-49.3%) were detected in all slopes. Only two slopes were determined to be at risk of toppling (6.7%-23.3%). Conditions that could maintain the calculated failure probabilities below critical limits were analyzed, considering the slope dips and dip directions. It was observed that the kinematic compatibility between the slope orientation and the discontinuity planes directly affected stability. Discontinuities oriented parallel to the slope face were found to pose significant planar sliding risks. Wedge sliding risks were increased in areas where multiple discontinuities intersected. Toppling probabilities were elevated when discontinuities intersected the slope face at approximately perpendicular angles. The findings indicated that the kinematic analysis method serves as a practical preliminary evaluation tool for slope design and the assessment of potential failure mechanisms.

Keywords: Planar sliding, rock slope, toppling, kinematic analysis, wedge sliding.

NECESSITY, DESIGN CRITERIA AND BASIC VERIFICATION METHODS FOR FOUR-WHEELED CARGO BICYCLES

Prof. Dr. MUSTAFA YAŞAR
Karabük Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği
myasar@karabuk.edu.tr

MEHMET YASİN HAMZAOĞLU
Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü/ Fen Bilimleri, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği
myhamzaoglu@gmail.com

Abstract
In this template, the design and effects of a unique pedal-assisted four-wheeled cargo bicycle (ÖDT-YB), developed as a sustainable solution for last-mile delivery logistics under the pressure of increasing e-commerce volume and urbanization, were investigated. Existing two- and three-wheeled cargo bicycles remain insufficient for heavy load transport duties due to balance and tipping issues, respectively. This study demonstrates the necessity of the four-wheeled pedal-assisted cargo bicycle class in response to engineering requirements. The study not only advocates for this necessity but also presents a holistic methodological framework defining how these vehicles should be designed and verified. The proposed framework defines that for a design to be considered market-ready and safe, it must possess results from three mandatory analysis methods: (1) Ergonomic Suitability via digital human modeling, (2) Structural Integrity via Finite Element Analysis (FEA), and (3) Standard Compliance aiming for advanced regulations like DIN 79010. This approach elevates the vehicles in question from the status of simple "modified bicycles" to the "light commercial bicycle" class, establishing a fundamental engineering development guideline for all future design and production processes.

Keywords: Four-wheeled cargo bike, Light commercial bike, Urban logistics, Structural analysis, Ergonomics.

FULL TEXT PAPERS

In this area, there are full-text papers sent to the IMASCON 2025 AUTUMN congress that meet the conditions of the congress.

EV TİPİ ÇAMAŞIR MAKİNELERİNDE SENSÖRSÜZ DENGESİZ YÜK ALGILAMA YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ

AHMET FARUK BAKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Fakültesi / Elektrik Mühendisliği Bölümü
fbakan@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0399-0359

ONURCAN GUNDOGAN
Yıldız Teknik Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Fakültesi / Elektrik Mühendisliği Bölümü
onurcan.gundogan@std.yildiz.edu.tr, ORCID: 0009-0003-3599-3399

ABDULKERIM GUNDOGAN
Yıldız Teknik Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Fakültesi / Elektrik Mühendisliği Bölümü
kerimg@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2244-4342

Özet

Ev tipi çamaşır makinelerinde dengesiz yük sorunu, yüksek devirli sıkma aşamasında makine performansını kısıtlayan önemli bir faktördür. Dengesiz yük nedeniyle oluşan aşırı titreşim ve gürültü, hem makine parçalarında strese neden olarak ömrü kısaltır hem de kullanıcı konforunu olumsuz etkiler (Martinello ve ark., 2021). Bu nedenle çamaşır makineleri, sıkma öncesinde yük dengesizliğini tespit edip giderecek mekanizmalara ihtiyaç duyar. Bu çalışmada, ilave sensör gerektirmeyen, algoritmik ve makine öğrenimi tabanlı dengesiz yük ağırlığı tahmini yöntemleri incelenmiştir. Literatürdeki yapay zekâ destekli veya model tabanlı yaklaşımlar kullanılarak tamburdaki dengesiz yükün kütlesini ve dağılımını tahmin etme teknikleri karşılaştırılmıştır. Temel yöntemler; bulanık mantık ve yapay sinir ağları, gözlemci tabanlı yöntemler, derin öğrenme yaklaşımları ve pekiştirmeli öğrenme tabanlı kontrol uygulamaları olarak gruplanmıştır. Sonuç olarak, sensörsüz yaklaşımların ek maliyetleri ortadan kaldırırken gerçek zamanlı dengesiz yük tespiti ve tahmininde başarılı olabildiği görülmüştür. Tartışma bölümünde yöntemlerin güçlü ve zayıf yönleri değerlendirilmiş ve gelecekte daha isabetli tahmin için olası çalışmalar ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çamaşır Makinesi, Dengesiz Yük, Makine Öğrenmesi

INVESTIGATION OF SENSORLESS UNBALANCED LOAD DETECTION METHODS IN HOUSEHOLD WASHING MACHINES

Abstract

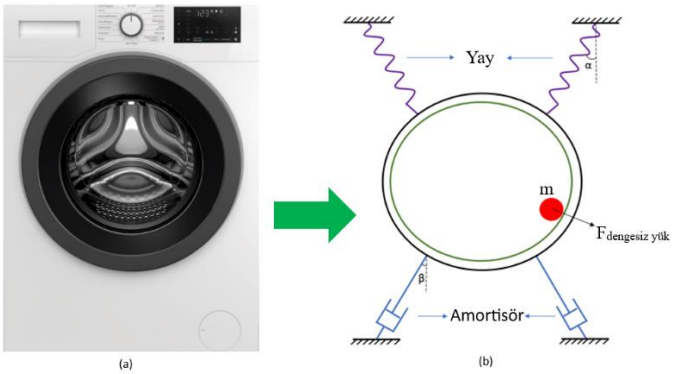
The unbalanced load problem in household washing machines is a major factor that limits machine performance during the high-speed spin cycle. Excessive vibration and noise caused by the unbalanced load not only induce stress on machine components—shortening their lifespan—but also negatively affect user comfort (Martinello ve ark., 2021). Therefore, washing machines require mechanisms that can detect and correct load imbalance before the spin cycle. In this study, sensorless imbalance mass estimation methods based on algorithmic and machine learning approaches are investigated. Techniques for estimating the mass and distribution of the unbalanced load inside the drum are compared using artificial intelligence–assisted and model-based approaches found in the literature. The main methods are grouped as follows: fuzzy logic and artificial neural networks, observer-based methods, deep learning approaches, and reinforcement

learning–based control applications. As a result, it has been observed that sensorless approaches can achieve successful real-time detection and estimation of unbalanced loads while eliminating additional costs. In the discussion section, the strengths and weaknesses of these methods are evaluated, and potential future studies for more accurate predictions are addressed.

Keywords: Washing Machine, Uneven Load, Machine Learning

1. GİRİŞ

Çamaşır makinelerinde dengesiz yük, çamaşırların tamburun içinde eşit dağılmaması sonucu oluşan kütle kaymasıdır. Özellikle sıkma anında yüksek hızlara çıkıldığında, dengesiz dağılmış çamaşır kitlesi tambur-damper sisteminde rezonansa yakın titreşimleri tetikleyebilir (Martinello ve ark., 2021). İdeal durumda ıslak çamaşırlar tambur içinde eşit dağılır ve rezonans bölgesi sorunsuz geçilir; ancak dengesiz yük oluştuğunda tambur grubunun kabin içinde salınım genliği artar ve en kötü durumda tambur gövdeye çarparak makineye zarar verebilir (Martinello ve ark., 2021). Dolayısıyla, dengesiz yükün erken tespiti ve yönetimi hem cihaz güvenliği hem de gürültü ve titreşimin azaltılması açısından kritik önemdedir.



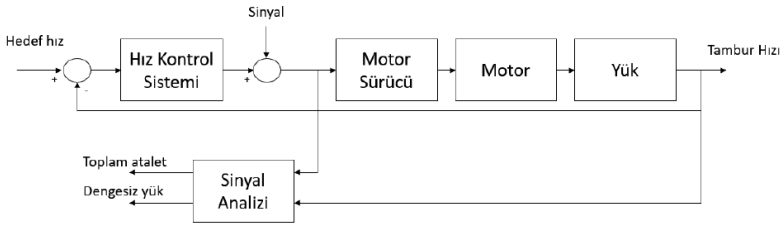
Şekil 1. (a) Çamaşır Makinesi (b) Çamaşır Makinesinde Dengesiz Yük (İrkil Genel, 2022)

Günümüzde çamaşır makineleri, dengesiz yükü algılayıp dengelemek için çeşitli stratejiler kullanmaktadır. En yaygın uygulama, sıkma öncesinde tamburu düşük hızlarda döndürerek çamaşırların dağılımını test etmek ve dengesizlik varsa sıkma hızını sınırlamak veya yeniden dağılım algoritmaları çalıştırmaktır. Bazı gelişmiş makineler, tambur içine su alarak dengesizliği dengeleme (ıslak dengeleme) veya tambur etrafındaki halka içerisinde hareketli denge bilyeleri kullanma gibi yöntemler denemiştir (Choi ve ark., 2025). Ayrıca doğrudan tambur titreşimini ölçerek dengesizliği algılayan sensörlü yöntemler de geliştirilmiştir. Örneğin, tambura entegre edilen kapasitif yer değiştirme sensörü ile tambur salınımları rezonans altı bölgede hassasiyetle tespit edilebilmiş; bu yöntem ivmeölçere kıyasla daha güvenilir ve düşük maliyetli bulunmuştur (Ramasubramanian ve Tiruthani, 2009). Benzer şekilde, piezoelektrik film tabanlı sensörlerle tambur titreşimleri gerçek zamanlı izlenebilmekte ve kontrol sistemine doğrudan aktarılabilmektedir (TE Connectivity, 2020). Lazerli deplasman ölçerler, yük hücreleri ve ivmeölçerlerin birleşimiyle yapılan çoklu sensör çalışmaları da dengesiz yükün hem miktarını hem de açısal konumunu yüksek doğrulukla tahmin etme amacı taşımaktadır (Yuan ve ark., 2007).

Ancak bu tür sensörlerin maliyeti artırdığı gibi, arıza riskini de yükselttiği bilinmektedir (Yörükoğlu ve Altuğ, 2013). Bu nedenle, sensörsüz dengesiz yük algılama yöntemleri büyük önem kazanmıştır.

Sensörsüz yöntemlerde amaç, makineye ilave donanım eklemeden, mevcut motor sürücü parametreleri veya dinamik sistemin modelleri yardımıyla dengesiz yükü tahmin etmektir. Modern çamaşır makinelerinde kullanılan motorlar, genellikle elektronik olarak kontrol edilen inverter tabanlı sistemlerdir. Geleneksel fırçalı üniversal motorlar sabit hızda ve yüksek sürtünmeyle çalıştığı için daha fazla gürültü ve titreşim üretirken, inverter kontrollü fırçasız motorlar (örneğin BLDC veya PMSM) değişken hız kontrolü sayesinde daha sessiz, dengeli ve enerji verimli çalışmaktadır (Domex Ltd., 2025). Ayrıca bu motorlar, aşınmaya daha

az yatkın oldukları için bakım ihtiyacını azaltır ve makine ömrünü uzatır. Özellikle doğrudan tahrikli (*direct-drive*) motor sistemleri, kayış ve kasnak gibi ara elemanlara gerek duymadığı için daha az hareketli parça barındırır ve böylece titreşim kaynaklarını minimize eder (Lamistacks Engineering, 2024). Bu tasarım, tambur hareketinin doğrudan motor üzerinden kontrol edilmesini mümkün kılar ve dolayısıyla sensörsüz sistemlerin veri tabanı olarak kullanılabilecek motor akımı, moment ve hız sinyallerinin doğrudan elde edilmesini sağlar (Martinello ve ark, 2021).



Şekil 2. Çamaşır Makinesinde Motor Kontrol Şeması (Bedetti ve Nicola, 2001)

Nitekim literatürdeki pek çok çalışma, yumuşak algılayıcı (*soft sensor*) yaklaşımıyla motor akım/sürat bilgisini işleyerek tamburdaki dengesiz kütleyi tahmin etme üzerine odaklanmıştır (Su ve ark., 2020). Bu bildiride, söz konusu sensörsüz yöntemlerin temel prensipleri, kullanılan algoritmik ve yapay zekâ teknikleri, karşılaşılan güçlükler ve elde edilen başarılar derlenmiştir.

2. ÇAMAŞIR MAKİNELERİNDE DENGESİZ YÜK ALGILAMA İÇİN KULLANILAN TEMEL YÖNTEMLER

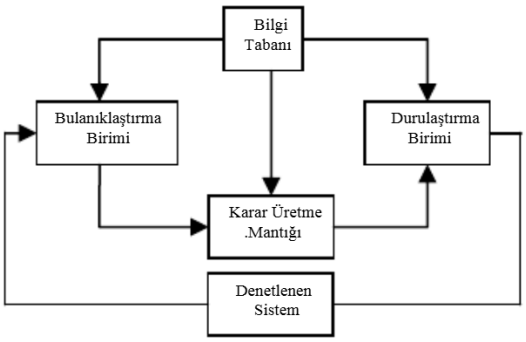
Sensörsüz dengesiz yük tahmini için literatürde hem klasik algoritmik yöntemler hem de yapay zekâ/makine öğrenimi yapıları kullanılmıştır. Bu bölümde başlıca yaklaşımlar ve teknik detayları sunulmaktadır.

2.1. Model Tabanlı Gözlemciler

Model tabanlı yöntemler, çamaşır makinesinin dinamik davranışını matematiksel olarak modelleyerek dengesiz yükün etkisini hesaplar. Örneğin, kayan rejim gözlemcisi (*sliding mode observer*) kullanımı bu alanda başarılı olmuştur. Su ve arkadaşları (2020), sensörsüz bir elektrik tahrik sisteminde (çamaşır makinesi veya benzeri döner makine) dengesiz kütleyi kestirmek için, rotorun konum ve hız bilgisini çıkaran bir *sliding mode* gözlemcisi tasarlamışlardır. Gözlemci ile gerçek zamanlı olarak tahmin edilen toplam atalet momenti, FFT tabanlı spektral analiz ile ayrıştırılarak tamburdaki dengesiz kütlenin büyüklüğü elde edilmiştir (Su ve ark., 2020). Bu yöntem, fiziksel modele (motor ve tambur sistemi denklemleri) dayalı olduğundan, ayrı bir eğitime gerek duymamaktadır ve farklı yük koşullarında bile kararlı sonuç verebildiği gösterilmiştir (Martinello ve ark., 2021). Model tabanlı bir diğer yaklaşım, motor torku ile tambur salınımı arasındaki ilişkiyi kullanmaktadır. Tambur hızındaki periyodik dalgalanma genliği, dengesiz kütle ağırlığı ile orantılıdır. Basit bir modelde, dengesiz yükün ağırlığını tahmin etmek için dalgalanma genliği ölçülüp, daha önceden kalibre edilmiş bir katsayı ile çarpılabilir. Martinello ve arkadaşları (2021), doğrudan tahrikli bir çamaşır makinesinde motorun gömülü kontrolcüsüne pozisyon izleyici bir gözlemci entegre ederek hem çamaşır yükünün ataletini hem de dengesiz kütleyi sensörsüz olarak hesaplayan bir algoritma geliştirmişlerdir. Önerilen yöntem, var olan motor kontrol altyapısını kullanmakta ve herhangi bir ek sensöre ihtiyaç duymamaktadır. Düşük devirlerde (100–600 rpm aralığında) yapılan ölçümlerle tamburdaki çamaşırların atalet momenti ve dengesiz kütlesi ayrı ayrı tahmin edilebilmiştir. Bu sayede makine, hem yıkama başında çamaşır miktarına göre su ve deterjanı optimize edebilmekte, hem de sıkma öncesi dengesizliği bilerek uygun hız profili uygulayabilmektedir (Martinello ve ark., 2021).

2.2. Hibrid AI Sistemleri

Makine öğrenimi yöntemleri, ölçülen sinyaller ile dengesiz yük arasında öğrenilmiş bir ilişki kurmayı hedefler. Bulanık mantık (*fuzzy logic*), uzman bilgisine dayalı kural tabanlı bir AI tekniğidir ve yumuşak sınırlarla değişkenleri ilişkilendirir. Yörükoğlu ve Altuğ (2013), dengesiz yükün kütlesini ve tambur içindeki açısal konumunu gerçek zamanlı tahmin etmek amacıyla bulanık mantık ve yapay sinir ağlarını bir arada kullanan bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, yatay tamburlu bir çamaşır makinesi için deney düzeneği kurulmuş; çeşitli dengesiz yük senaryoları için tambur titreşim verileri toplanmıştır. Öncelikle bulanık mantık ile veriler ön işlenip yorumlanmış, ardından çok katmanlı bir yapay sinir ağı bu verilerle eğitilerek dengesiz yükün konumu ve büyüklüğü çıktısı üretilmiştir. Sonuçta önerilen sistemin yükün açısal pozisyonunu %3 hata payıyla belirleyebildiği ve kütle tahmininde de yüksek doğruluk sağladığı raporlanmıştır (Yörükoğlu ve Altuğ, 2009). Dahası, gerçek zamanlı bir kontrol sistemine entegre edilen bu algoritmanın, tespit ettiği dengesizliği gidermek üzere tamburu uygun yönde yavaşça döndürüp çamaşırları dağıtarak dengesiz yükü elimine edebildiği gösterilmiştir (Yörükoğlu ve Altuğ, 2013). Bu bulgu, yapay zekâ yöntemlerinin sadece tahmin için değil, aynı zamanda aktif dengeleme amacıyla da kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 3. Bulanık Mantık Denetim Sistemi (Özkop E. ve ark., 2004)

Bulanık mantık, yapay sinir ağları kombinasyonunun avantajı, insan uzmanlık bilgisini (örneğin "titreşim şiddeti çok arttıysa yük dengesizdir" gibi kuralları) ve veriden öğrenmeyi bir araya getirmesidir. Bu sayede sistem, beklenmedik ara durumlarda da makul tahminler yapabilir. Ancak sinir ağlarının eğitimi için çeşitli dengesizlik senaryolarında veri toplanması gerekmiştir; bu da her makine modeli için ayrı bir kalibrasyon süreci demektir. Yine de çalışma, sensörsüz olarak yalnızca motor ve tamburdan alınan bilgilerle (muhtemelen motor akımı veya tambur hız sensörü verisi) dengesizliğin hızlı ve doğru şekilde kestirilebildiğini kanıtlamıştır (Yörükoğlu ve Altuğ, 2013).

2.3. Derin Öğrenme ve Gelişmiş Sinir Ağları

Son yıllarda, daha karmaşık problem yapıları için derin öğrenme yöntemleri de denenmektedir. Derin öğrenme, büyük veri setlerinden otomatik özellik çıkarımı yaparak yüksek başarımlı tahmin modelleri oluşturabilir. Çamaşır makinesinde dengesiz yük tahmini problemi, temelde bir zaman serisi verisi (motor sinyalleri) analiz problemidir. Bu nedenle tekrarlayan sinir ağları (RNN) ve türevleri bu alana uygundur. Shahbazi ve arkadaşları (2024), makine durum gözlemcisi gibi davranan özel bir RNN mimarisi önererek çamaşır makinesindeki dengesiz yük durumunu öngörmeye çalışmışlardır. Geliştirdikleri NARX tabanlı (*Nonlinear AutoRegressive with eXogenous Input*) geri beslemeli ağ yapısını "NAR3" olarak adlandırmıştır ve bu yöntemle bağlı (*coupled*) dengesizliği dahi tespit edebildiklerini rapor etmiştir (Shahbazi ve ark., 2024). *Coupled imbalance* burada makinenin hem kendi montaj dengesizliği (örn. ayak ayarının bozukluğu) hem de çamaşır yükü dengesizliği kombinasyonunu ifade etmektedir. İlgili çalışmada, zaman serisi verileri görüntü formatına dönüştürülerek bir Evrişimli Sinir Ağı (CNN) ile de ayrı bir deneme yapılmış ve CNN yaklaşımının sonuçlarının NAR3'e oldukça yaklaştığı belirtilmiştir (Shahbazi ve ark., 2024). Yine de NARX tabanlı NAR3 modelinin özellikle denge ve dengesizlik durumlarını ayırt etmede en başarılı yöntem olduğu vurgulanmıştır (Shahbazi ve ark., 2024). Bununla birlikte, çok sayıda geçmiş gözlem ihtiyacı duyan

derin öğrenme ağlarının eğitim süresi uzun olabilmektedir (Shahbazi ve ark., 2024). Derin öğrenme yöntemleri, uygun donanım ve veriyle yüksek doğruluk sunsalar da gömülü sistemlerdeki kısıtlı işlem gücü ve bellek nedeniyle dikkatli tasarlanmalıdır. Günümüzde çamaşır makinelerinde bu denli ağır modeller henüz yaygın değildir.

2.4. Pekiştirmeli Öğrenme ve Akıllı Kontrol Teknikleri

Sensörsüz dengesiz yük algılama sadece pasif bir tahmin olarak kalmayıp, aktif kontrol stratejileriyle birleştirildiğinde daha bütüncül çözümler ortaya çıkar. Pekiştirmeli öğrenme (*reinforcement learning*), bir sistemin ödül-ceza mekanizmasına göre kendi kendine strateji geliştirmesini sağlar. Bu yöntem, çamaşır makinesinde dengesizliği minimize edecek kontrol politikaları öğrenmek için kullanılabilir. Shimizu ve çalışma arkadaşları (2022), bir çamaşır makinesinin sıkma işlemi sırasında gürültü ve titreşimi azaltmak amacıyla Q-öğrenme algoritmasını uygulamışlardır. Bu yaklaşımla, makine her sıkma denemesinde dengesizlik düzeyine göre tambur hız profilini ayarlayarak, zaman içinde en düşük titreşimli sıkma stratejisini öğrenmiştir. Sonuçta, klasik sabit programlı kontrol yerine öğrenen kontrolcü kullanmanın, değişen yük koşullarında bile daha sessiz ve dengeli bir sıkma sağladığı belirtilmiştir. Pekiştirmeli öğrenme tabanlı bu tür çözümler henüz araştırma aşamasında olup, gerçek ürünlere uygulanmaları için güvenilirlik ve hesaplama yükü konularında geliştirmelere ihtiyaç vardır. Yine de AI tabanlı kontrol teknikleri gelecekte uyarlanabilir dengesizlik kontrolü konusunda önemli bir potansiyel sunmaktadır.

3. SENSÖRSÜZ YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Literatürde öne çıkan sensörsüz dengesiz yük tahmin yöntemleri, farklı açılardan karşılaştırıldığında aşağıdaki gözlemler yapılabilir:

- **Algoritmik Gözlemci vs. Veri Temelli Öğrenme:** Model tabanlı gözlemci yöntemleri (örn. *sliding mode observer,* FFT) fiziksel ilkelere dayalı olup yorumlanabilirlikleri yüksektir yani sonuçlar makinenin dinamik modeliyle açıklanabilir. Buna karşın, yapay sinir ağı veya derin öğrenme modelleri kara kutu şeklinde çalışır; yüksek doğruluk sunsalar da iç karar mekanizmalarını yorumlamak zordur. Örneğin Martinello (2021) yönteminde tahmin, motor-fizik modeline dayalı olarak yapıldığından hangi durumda ne olacağı öngörülebilirken (Martinello ve ark., 2021), NARX/CNN gibi yöntemlerde model binlerce parametre öğrenir ve her senaryoda nasıl bir iç hesaplama yaptığı açık değildir.

- **Doğruluk ve Başarım:** Yapay zekâ tabanlı yöntemler genellikle daha kompleks sistemleri modelleyebildiği için potansiyel olarak daha yüksek doğruluk vadeder. Nitekim Yörükoğlu, (2013) çalışmasında bulanık mantık YSA yaklaşımı ile açısal konumda %3 hata oranı gibi oldukça iyi bir sonuç almıştır (Yörükoğlu ve Altuğ, 2013). Derin öğrenme modelleri de uygun veriyle hassas tahmin sunabilir. Öte yandan, model tabanlı yöntemler dengesiz yük kütlesini makul bir sapma ile hesaplayabilir ancak ekstrem durumlarda (örneğin çok karmaşık çamaşır dağılımları) basitleştirilmiş modeller yetersiz kalabilir. Sonuç olarak, doğruluk açısından kesin bir galip olmamakla birlikte, doğru tasarlanmış bir sinir ağı modeli en yüksek doğruluğa ulaşma potansiyeli taşır; ancak bunun için geniş kapsamlı deney verisi ve eğitim süreci gerekir.

- **Gerçek Zamanlılık ve Hesaplama Yükü:** Çamaşır makinesi kontrolcülerinin genelde sınırlı işlemci gücü ve belleği vardır. Bu nedenle algoritmaların gerçek zamanlı çalışabilecek şekilde hafif olması gerekir. Gözlemci tabanlı veya bulanık mantık gibi yöntemler hesaplama açısından hafiftir ve tipik bir mikrokontrolcüde rahatça çalışabilir. Örneğin *sliding mode* gözlemci + FFT yöntemi, basit aritmetik işlemler ve dönüşümler içerir ve gerçek zamanda uygulanabilir (Su ve ark., 2020). Buna karşılık, derin sinir ağları (RNN, CNN) çok sayıda çarpım-toplama işlemi ve bellek erişimi gerektirir; eğer optimize edilmezse gömülü sistemde gecikmelere yol açabilir. Shahbazi (2024) çalışmasında belirtilen NAR3 modelinin donanıma kodlanmasının basit olduğu ifade edilse de (Shahbazi ve ark., 2024), bu göreceli bir ifadedir – klasik yöntemlerle kıyaslandığında sinir ağlarının yine de daha fazla kaynak gerektirdiği

açıktır. Bu yüzden, uygulanacak yöntemin seçimi yapılırken cihazın donanım kısıtları göz önüne alınmalıdır.

- **Genelleştirme ve Uyarlanabilirlik:** Sensörsüz tahmin algoritmalarının farklı çamaşır yükü tiplerine, makine modellerine veya kullanım senaryolarına uyum sağlaması istenir. Model tabanlı yöntemlerde sistem modelinin parametreleri (tambur kütlesi, yay katsayıları vs) değişirse tahmin doğruluğu düşebilir; her yeni model için yeniden ayar gerekebilir. Makine öğrenimi yöntemleri ise eğitim verisiyle gördüğü senaryoları genelleyerek beklenmedik durumlarda daha tutarlı olabilir. Örneğin bir sinir ağı hem küçük hem büyük çamaşır yükleriyle eğitilirse, aradaki orta büyüklükteki yük için de makul bir tahmin yapabilir. Yine de eğitim verisi dışında çok farklı bir durum geldiğinde öğrenilmiş model de hatalı tahmin yapabilir. Bu bakımdan, uyarlanabilir öğrenme teknikleri (*online learning*) gelecekte önem kazanabilir. Pekiştirmeli öğrenme gibi yöntemler, sistem çalıştıkça kendini güncelleyebildiği için değişken şartlara adaptasyon sağlayabilir. Ancak kontrol kararlılığı açısından bu yaklaşımların dikkatle tasarlanması gerekir.

Genel olarak, sensörsüz yöntemlerin tümü, makineye ek maliyet getirmeden dengesiz yük sorununu saptayabilme yönüyle değerlidir. Her bir yaklaşımın kendine göre avantajları ve sınırları vardır; bu nedenle pratikte üreticiler güvenlik, maliyet ve performans kıstaslarını dikkate alarak hibrit çözümler de geliştirebilmektedir.

Tablo 1. Sensörsüz Dengesiz Yük Algılama Yöntemlerin Karşılaştırılması

Çalışma	Metod	Giriş Parametreleri	Anahtar Çıktılar	Kısıtlar
Martinello ve ark. (2021)	Model Tabanlı Gözlemci	Motor Sürücü Sinyalleri	Dengesizlik Durumu ve Atalet Tahmini	Parametre bağımlılığından dolayı farklı yük tipleri için model uyumu sağlanmalıdır.
Yörükoğlu & Altuğ (2013)	Bulanık-Mantık + Yapay Sinir Ağı	Motor Akımı ve Tambur Hızı	Dengesiz Yük Kütlesi ve Konumu	Ön eğitim gerektirir. Yapısı nedeni ile açıklanabilirliği kısıtlıdır.
Su ve ark. (2020)	Model Tabanlı Gözlemci	Motor Sürücü Sinyalleri	Dengesiz Yükün Kütlesi	Motor ve tambur sisteminin parametlerine bağımlıdır. Ani hız değişmleri performansın etkileyebilir.
Shahbazi ve ark. (2024)	NARX Tabanlı Nöral Gözlemci	Motor Sürücü Sinyalleri, Açısal Hız	Dengesizlik Durumu	Modeli eğitmek için geniş kapsamlı gözlem verisi gerekir.

Shimizu ve ark. (2022)	Pekiştirmeli Öğrenme	Motor Akımı	Gerçek Zamanlı Dengesizlik Tahmini	Optimal kontrolü bulmak için çok sayıda deneme gerektirir. Erken aşamalarda performansta düşüş görülebilir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, ev tipi çamaşır makinelerinde sensörsüz dengesiz yük algılama yöntemleri sistematik olarak incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler hem model tabanlı gözlemci tekniklerinin hem de makine öğrenimi yaklaşımlarının dengesiz yükün büyüklüğünü ve dağılımını başarılı biçimde tahmin edebildiğini göstermektedir. Sensörsüz yöntemler, ek donanım gerektirmeden düşük maliyetli ve gerçek zamanlı bir çözüm sunarken, derin öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme gibi yeni nesil yapay zekâ yaklaşımları gelecekte daha yüksek doğruluk ve uyarlanabilirlik potansiyeli taşımaktadır. Sonuç olarak, bu yöntemlerin olgunlaşmasıyla birlikte çamaşır makinelerinde titreşim, gürültü ve enerji kaybı önemli ölçüde azalacak; daha güvenli, verimli ve akıllı sistemlerin önü açılacaktır.

5. TARTIŞMA

Sensörsüz dengesiz yük ağırlığı tahmini alanında yapılan çalışmalar, bu sorunun büyük ölçüde algoritmik yöntemler ile çözülebileceğini göstermektedir. Güncel araştırmaların sonuçları tartışılacak olursa:

Başarımlar: Birçok çalışma, sensörsüz tahminin pratik olarak mümkün ve yeterince doğru olduğunu ispatlamıştır. Örneğin bulanık mantık ve sinir ağı kullanan yöntemler, deneysel düzende hem kütle hem konum tahminini başarıyla yapmıştır (Yörükoğlu ve Altuğ, 2013). Motor akımı ve hız sinyallerinden çıkarım yapan gözlemci tabanlı yaklaşımlar ise, %5-10 aralığında kütle tahmin hatası ile güvenilirlik sunmaktadır (bu, çoğu uygulama için kabul edilebilir bir seviyedir). Bu sayede, makine sıkma öncesi dengesizliğin aşırı olup olmadığını sensörsüz de belirleyebilir hale gelmiştir. Ayrıca, tespit edilen dengesizliğe karşı önlem (ör. tamburu yavaşlatıp tekrar dağıtma, su ekleyerek dengeleme veya kullanıcıya uyarı verme) alınması kolaylaşmıştır. Sonuçta makinelerin sıkma performansı artarken, aşırı titreşim kaynaklı hasar ve gürültü azalmaktadır.

Zorluklar: Her ne kadar yöntemler başarılı olsa da bazı zorluklar devam etmektedir. Farklı çamaşır türleri (ağır havlular veya hafif kıyafetler), tambur içinde suyun varlığı, makinenin zemin eğimi, amortisördeki aşınmalar gibi etmenler, algoritmaların kararlılığını etkileyebilir. Örneğin ıslak ve kuru yük dağılımları arasında sistem dinamiği değişir; tahmin algoritmasının bu değişimi ayırt edebilmesi gerekir. Makine öğrenimi yöntemleri, eğitim verisi bu çeşitliliği kapsamazsa, beklenmedik bir kombinasyonda başarısız olabilir. Model tabanlı yöntemler ise modele girmeyen bir etki (örneğin sıkışan bir yabancı cisim) olduğunda yanılabilir. Dolayısıyla, geniş senaryo testleri ve gerektiğinde birden fazla yöntemin birlikte kullanılması gerekebilir.

Ticarileşme: Dengesiz yük kontrolü, üreticilerin rekabet avantajı sağlayabildiği bir konudur. Bu nedenle akademik literatürde sınırlı sayıda yayın olsa da şirketler AR-GE bünyesinde ileri algoritmalar geliştirmeye devam etmektedir. İleride, bu alandaki akademik bilgiler ile endüstriyel deneyimlerin birleşmesiyle daha da etkili ve güvenilir sistemler ortaya çıkacaktır.

Geleceğe Yönelik Öneriler: İleriki çalışmalarda birkaç yön özellikle ilgi çekicidir:

- **Gerçek Zamanlı Adaptasyon:** Makine çalışırken, tahmin algoritmasının kendini güncellemesi. Örneğin pekiştirmeli öğrenme veya çevrimiçi parametre ayarlama ile, makine her yıkamada daha akıllı hale gelebilir.

- **Farklı Arızaların Ayırt Edilmesi:** Dengesiz yük kaynaklı titreşim ile farklı arıza durumlarının (ör. amortisör arızası, rulman bozulması) ayrıştırılması önemlidir. Gelecekte AI algoritmaları, titreşim imzasından sorunun dengesiz yük mü yoksa başka bir bakım gereksinimi mi olduğunu teşhis edebilir.
- **Dijital İkiz Modeller:** Çamaşır makinesinin dijital ikizini oluşturarak, farklı yük senaryolarını simüle edip algoritmaları sanal ortamda eğitmek/test etmek mümkün olabilir. Bu, gerçek dünyada deneyi zor veya maliyetli durumlar için faydalı olacaktır.
- **Çoklu Sensör Verisi Entegrasyonu:** Tamamen sensörsüz yaklaşım yerine, mevcut makine verilerine ek olarak ucuz bazı sensörlerin (ör. tek eksenli basit bir ivme sensörü) birleşimi düşünülebilir. Akıllı algoritmalar, az sayıda sensörden gelen veriyi birleştirerek daha sağlam tahminler yapabilir.

Özetle, ev tipi çamaşır makinelerinde dengesiz yük algılama ve tahmini için sensörsüz yöntemler giderek olgunlaşmaktadır. Makine öğrenimi ve algoritmik kontrol tekniklerinin kullanılmasıyla, geleceğin çamaşır makineleri çok daha akıllı, titreşimsiz ve güvenli sıkma yapabilecektir.

TEŞEKKÜR

Çalışmanın gerçekleşmesindeki desteklerinden dolayı Beko Corparate'e teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKÇA

Bedetti, Nicola (2001), Method for determining total inertia and unbalanced load in a laundry drum of a washing machine, *1113102A1*,

Choi C., Kwon Y., Kang D., Kim C., Jung S. (2025), Development of Washing Machine Dehydration Unbalance Control Specifications Through Bayesian Optimization, *Appl. Sci.*, 15(3), 1632

Domex Ltd. (2025), *Which Is Better: An Inverter or Non-inverter Washing Machine*, 29 Ekim 2025 tarihinde Domex: http://www.domex-uk.co.uk/help-advice/which-is-better-an-inverter-or-non-inverter-washing-machine/#:~:text=Also%2C%20non,quite%20a%20lot%20of%20noise adresinden alındı.

İrkil Genel H. (2022), Çamaşır Makinesinde Dengesiz Yükün Makine Öğrenmesi İle Belirlenmesi, *Yıldız Teknik Üniversitesi*.

Lamistacks Engineering (2024), *Direct Drive Motor vs. BLDC Motor For Washing Machines*, 29 Ekim 2025 tarihinde Lamistacks Engineering: http://lamistacks.com/washing-machines-direct-driven-vs-bldc motor/#:~:text=Noise%20and%20Vibration%3A%20Direct%20Drive,where%20noise%20is%20a%20concern adresinden alındı.

Martinello D., Rubino S., Bojoi R. (2021), An eDrive-Based Estimation Method of the Laundry Unbalance and Laundry Inertia for Washing Machine Applications, *Energies*, 14(3), 637

Özkop E., Atlas I.H., Akpınar A.S. 2004, Bulanık Mantık Denetleyicili Güç Sistem Uygulaması, *ELECO2004*

Ramasubramanian M. K., Tiruthani K. (2009), A Capacitive Displacement Sensing Technique for Early Detection of Unbalanced Loads in a Washing Machine, *Sensors*, 9(12), 9559-9571

Shahbazi H., Mohagheghiyan M. P., Pour H. K., (2024), *Predicting the Dynamic Behavior of a System with a Neural State Observer Using Recurrent Neural Networks a Case Study on a Washing Machine*, 29 Ekim 2025 tarihinde SSRN: https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4797327 adresinden alındı.

Shimizu T., Funakoshi H., Kobayashi T., Sugimoto K. (2022), Reduction of noise and vibration in drum type washing machine using Q-learning, *Control Engineering Practice*, 122, 105095

Su Y., Liang D., Kou P. (2020), Estimation of Unbalance Mass for Sensorless Electric Drive System Based on Sliding Mode Observer and FFT, *2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 18(3), 545-549

Yörükoğlu A., Altuğ E. (2009), Determining the Mass and Angular Position of the Unbalanced Load in Horizontal Washing Machines, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*

Yörükoğlu A., Altuğ E. (2013), Estimation of Unbalanced Loads in Washing Machines Using Fuzzy Neural Networks, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(3), 1182-1190

Yuan Y., Buendia A., Martin R., Ashrafzadeh F. (2007), Unbalanced Load Estimation Algorithm Using Multiple Mechanical Measurements for Horizontal Washing Machines, *Sensors*, 1303-1306

TE Connectivity (2020), *Home Appliance Sensors*, 29 Ekim 2025 tarihinde TE Connectivity: https://www.te.com/en/industries/appliances/applications/sensors-for-home-appliances.html?tab=pgp-story adresinden alındı.

HAFİF SİLAHLARDA GERİ TEPME KUVVETİNİN ÖLÇÜMÜNÜN İNCELENMESİ

SONER KAYAHAN
Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fak. Mekatronik Müh. Bölümü, Düzce
kayahansoner3@gmail.com, ORCID: 0009-0008-1198-2149

Prof. Dr. BÜLENT AYDEMİR
Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fak. Mekatronik Müh. Bölümü, Düzce
bulentaydemir@duzce.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6848-2681

Özet

Ateşli silahlarda geri tepme, sistemin mekanik kararlılığı, kullanıcı güvenliği ve atış hassasiyeti üzerinde doğrudan etkili bir parametredir. Mermi ateşlendiğinde, barut gazlarının ani genleşmesi sonucu oluşan basınç silah gövdesine ters yönde bir kuvvet oluşturur ve bu durum "geri tepme kuvveti" olarak tanımlanır. Bu kuvvetin büyüklüğü; patlayıcı kütlesi, çıkış hızı, silahın ağırlığı, yay sabiti, sönümleme özellikleri ve namlu geometrisi gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu nedenle geri tepme kuvvetinin ölçülmesi ve kontrolü, modern hafif silah tasarımlarında hem kullanıcı konforu hem de sistem güvenilirliği açısından kritik bir konudur.

Bu çalışmada, silahlarda geri tepme kuvvetinin ölçümü, analizi ve azaltılmasına yönelik literatürde yer alan farklı çalışmalar incelenmiştir. Çalışmalar, deneysel yöntemler, sayısal modelleme ve sönümleyici sistem tasarımları bakımından karşılaştırılmıştır. Literatürde, silahlarda geri tepme kuvvetinin ölçümüne yönelik standart bir yöntemin bulunmadığı ve ölçüm–modelleme entegrasyonu ile çalışmaların yapıldığı belirlenmiştir. Gelişen teknoloji ile gelecekteki araştırmalarda çok eksenli sensör sistemlerinin geliştirilmesi, analiz ve modelleme sistemlerindeki gelişimler ve yapay zekâ destekli dijital ikiz yaklaşımlarının kullanılması ile önemli değişimleri olacağı öngörülmektedir. Bu çalışma sonucunda, silahların geri tepme kuvvet ölçüm sistemlerinin kıyaslanması ile ileride bu alanda çalışma yapacak araştırmacılar için en uygun deney sistem modeli belirlenmesi konusunda yol gösterici olmak hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geri tepme kuvveti, hafif silahlar, deneysel ölçüm, geri tepme kuvveti ölçümü

INVESTIGATION OF RECOIL FORCE MEASUREMENT IN SMALL WEAPONS

Abstract

In firearms, recoil is a parameter that directly affects the mechanical stability of the system, user safety, and shooting accuracy. When a bullet is fired, the pressure resulting from the sudden expansion of gunpowder gases creates a force in the opposite direction on the gun's body, and this is defined as "recoil force." The magnitude of this force depends on many parameters, such as explosive mass, muzzle velocity, weapon weight, spring constant, damping properties, and barrel geometry. Therefore, measuring and controlling recoil force is a critical issue in modern small arms designs, both for user comfort and system reliability.

This study examines various studies in the literature on the measurement, analysis, and reduction of recoil force in weapons. These studies were compared in terms of experimental methods, numerical modeling, and

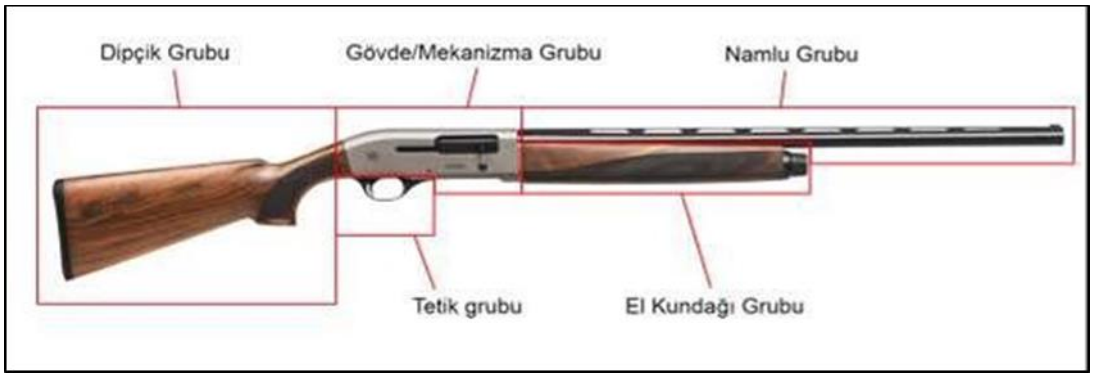
damping system designs. It was determined that there is no standard method for measuring recoil force in weapons in the literature, and that studies are conducted using measurement-modeling integration. It is anticipated that significant changes will occur in future research with the development of multi-axis sensor systems, advancements in analysis and modeling systems, and the use of artificial intelligence-supported digital twin approaches. This study aims to guide researchers in determining the most appropriate experimental system model by comparing weapon recoil force measurement systems in the future.

Keywords: Recoil force, small arms, experimental measurement, recoil force measurement

1. GİRİŞ

Ateşli silahların geliştirilmesi insanlık tarihi için bir dönüm noktası oluşturmaktadır. Barutun 9. yüzyılda Çin'de icadıyla başlayan süreç, 13. yüzyılda Avrupa'da "fire lance" olarak bilinen ilkel tüfeklerin geliştirilmesiyle mühendislik bir boyut kazanmıştır. Bu dönemde barut gazlarının kontrollü yanma prensibine dayalı kinetik enerji üretimi, dönemin diğer mekanik enerji dönüşüm sistemlerine göre benzersiz bir özgül enerji sağlamış, dolayısıyla savaş teknolojilerinde devrim yaratmıştır. 15. ve 16. yüzyıllarda malzeme üretim teknolojilerindeki ilerlemeyle birlikte dökme demir ve bronz namluların üretilebilir hâle gelmesi, hem silah güvenliğini hem de atış doğruluğunu artırmıştır. Bu gelişmeler, "ateşli silah" kavramının yalnızca bir silah değil, aynı zamanda bir dinamik enerji dönüşüm sistemi olarak ele alınmasını da sağlamıştır [1].

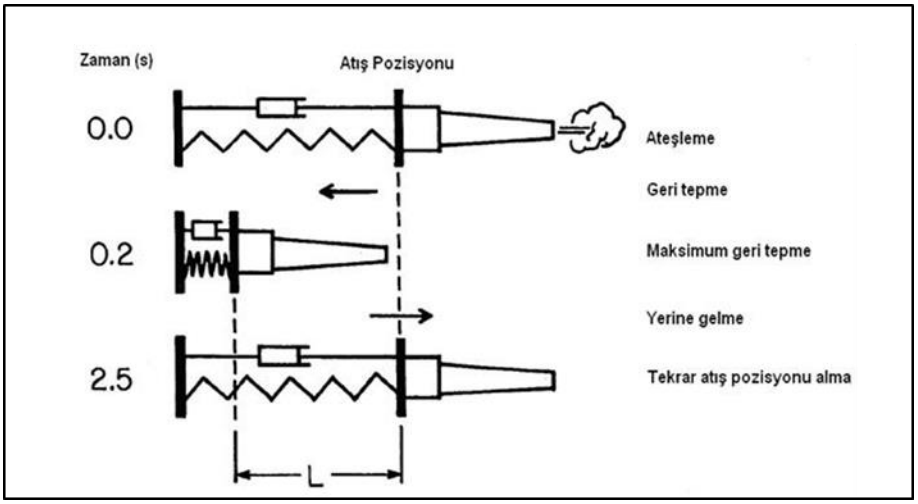
Ateşli silah teknolojisinin geliştirilmesinde en kritik mühendislik adımı, geri tepme kuvvetinin fark edilmesi ve kontrol altına alınması olmuştur. Newton'un üçüncü hareket yasasında tanımlandığı üzere, her etkiye karşı eşit ve zıt yönde bir tepki kuvveti doğar. Mermi, namludan ileriye doğru ivmelenirken aynı büyüklükte bir momentte silahın gövdesinden geriye doğru iletilir. İlk dönemlerde bu etki silahın yapısal dayanım sınırlarını zorlamış hem namlu deformasyonlarına hem de kullanıcı yaralanmalarına neden olmuştur. 17. ve 18. yüzyıllarda geri tepme enerjisinin dağıtılabilmesi için ahşap dipçikler ve kalın omuz dayanakları kullanılmıştır (Şekil 1). Ancak bu yöntem yalnızca kuvvetin hissedilmesini azaltmış, fiziksel geri tepme miktarını değiştirmemiştir [2].



Şekil 1. Erken Dönem Tüfek Resmi ve Parçaları

19. yüzyılda mekanik yay sistemlerinin ve hidrolik frenlerin endüstride yaygınlaşması, geri tepme enerjisinin yönetilmesine yönelik ilk sistematik çözümlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. 1880'lerde Norveçli mühendis Axel Paulsen'in geliştirdiği geri tepmeli top mekanizmaları, kısa strok prensibiyle çalışan ilk sönümleyici yapısı olarak sayılabilir. Bunu takiben 1897'de Fransız yapımı 75 mm sahra topu, hidro pnömatik geri tepme sistemini kullanan ilk platform olmuştur (Şekil 2). Bu sistem, atış anında oluşan

kinetik enerjiyi hidrolik yağ ve sıkıştırılmış hava karışımıyla absorbe edilmesini sağlamış ve böylece hem silahın denge süresini hem de hedefe yeniden nişan alma süresini kısaltmıştır. Bu gelişme, geri tepmenin yalnızca bir "tepki kuvveti" değil, yönetilmesi gereken mühendislik enerjisi olarak görülmesi gerektiğini ortaya koymuştur [1-4].



Şekil 2. Hidro Pnömatik Geri Tepme Sistemini Prensip Şeması

20. yüzyılın başlarından itibaren bireysel hafif silahların yaygınlaşmasıyla birlikte, geri tepme mekanizmaları topçu sistemlerinden kişisel silahlara uyarlanmıştır. 9×19 mm Parabellum mühimmatının 1902'de Georg Luger tarafından geliştirilmesi, modern tabancalarda standartlaşmış bir geri tepme referansı oluşturmuştur. Bu mühimmatın görece düşük ağırlığı ve yüksek basınç üretimi, yarı otomatik tabancalarda geri tepmeli çalışmanın verimli bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmıştır. Bu dönemde geliştirilen Browning tipi kısa geri tepmeli kilitleme mekanizması, icra yaylarının silah dinamiği üzerindeki etkisini belirleyen temel yapı olmuştur. İcra yayının geri tepme enerjisini depolayıp kontrollü biçimde boşaltması hem mekanizma çevrim sürelerini hem de kullanıcıya aktarılan kuvvet profilini doğrudan etkilemiştir [3].

Günümüzde ateşli silah mühendisliği, geri tepme enerjisinin yönetimini sadece konfor veya kontrol meselesi olarak değil, aynı zamanda balistik doğruluk, parça ömrü ve sistem güvenilirliği açısından çok boyutlu bir optimizasyon problemi olarak ele almaktadır. Geri tepme kuvvetinin ölçümü ve analizi, hem yeni nesil mekanik tasarımların doğrulanmasında hem de mühimmat-silah etkileşimlerinin nicel değerlendirilmesinde temel parametre hâline gelmiştir. Bu nedenle literatürde son yıllarda, geri tepme kuvvetinin ölçüm teknikleri, deney düzeneği geometrileri, sensör seçimleri ve veri toplama protokollerine ilişkin çalışmalar yoğunlaşmıştır [5-6].

Ateşli silahlarda geri tepme, mermideki momentum değişiminin doğrudan bir sonucudur. Mermi ateşlendiğinde, namlu içinde ani bir basınç değişimi oluşur ve bu basınç hem mermiyi ileri yönde hızlandırır hem de silah gövdesine ters yönde bir momentum oluştur [7]. Bu değişim sonucunda oluşan geri tepme kuvveti, atıcı konforu, atış hassasiyeti ve silah güvenilirliği açısından kritik bir parametredir.

Geri tepme olayı, temel olarak iki aşamadan oluşur:

1) Birincil geri tepme etkisi- mermi namlu içerisindeyken oluşan gaz basıncının etkisiyle meydana gelen ani kuvvet,
2) İkincil geri tepme etkisi- mermi namludan çıktıktan sonra genleşen gazların neden olduğu ek kuvvet [8]. Modern silah tasarımlarında, bu kuvvetlerin ölçülmesi ve kontrol altına alınması hem kullanıcı güvenliği hem de sistem performansı açısından büyük önem taşır.

Literatürde geri tepme kuvvetinin ölçümü için farklı metotlar mevcuttur ancak standart bir metodoloji bulunmamaktadır. Bu çalışma, mevcut ölçüm yöntemlerini, sayısal modelleme tekniklerini ve sönümleme sistemlerini kapsamlı bir şekilde inceleyerek, gelecekte bu alanda çalışma yapacak araştırmacılara yol gösterici bir kaynak oluşturmayı hedeflemektedir.

2. GERİ TEPME KUVVETİ ÖLÇÜMÜ VE ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

Geri tepme kuvvetinin doğru biçimde ölçülmesi için teorik denkleminin doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Geri tepme kuvveti, momentum korunumu prensibi ile açıklanabilir. Silah-mermi sisteminde, öncelikle toplam momentum sıfırdır. Ateşleme sonrası mermi ve barut gaz bir yönde hareket oluştururken, silah gövdesinde zıt yönde bir hareket oluşur. Bu aşağıdaki Formül (1) ile gösterilebilir.

$$m_m \cdot V_m + m_g \cdot V_g = m_s \cdot V_s \qquad (1)$$

Burada:

m_m: Mermi kütlesi

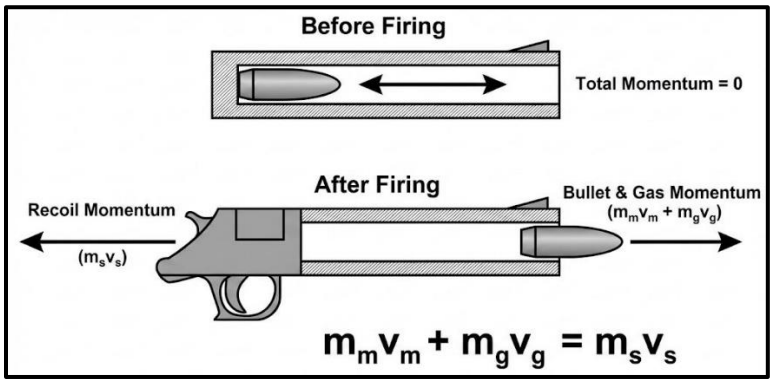
v_m: Mermi hızı

m_g: Barut gazı kütlesi

v_g: Barut gaz çıkış hızı

m_s: Silah kütlesi

v_s: Silahın geri tepme hızı



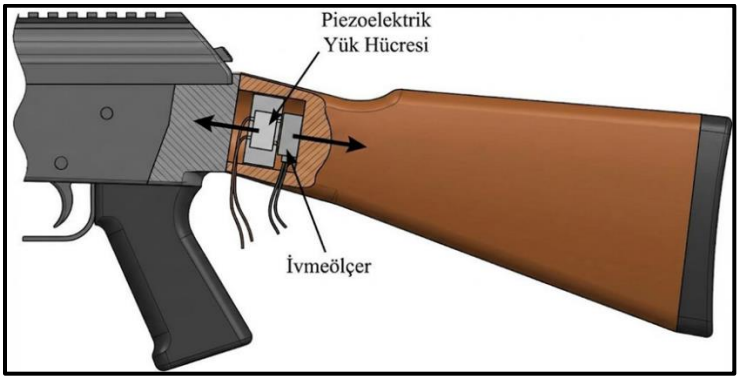
Şekil 3. Geri Tepme Momentum Diyagramı

Geri tepkime kuvveti ölçümü için çok farklı sistemler tasarlanmış ve kullanılmaktadır. Temel olarak 2 farklı gruba ayrılabilir. Bunlar:

1. Doğrudan kuvvet ölçüm sistemleri
2. Dolaylı kuvvet ölçüm sistemleridir.

Geri tepkime kuvveti ölçüm sistemlerinden bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Piezoelektrik yük hücresi kullanan doğrudan kuvvet ölçüm sistemi olarak tanımlanır. Piezoelektrik sensörler, mekanik hareketi elektrik sinyaline çok hızlı dönüştürebilme özellikleri sayesinde geri tepme ölçümlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde en çok tercih edilen sistemlerde, PCB Piezotronics veya Kistler piezo kuvvet sensörleri kullanılır. Kuvvet sensörünün yanında piezo ivmeölçerin de paralel kullanımı uygulamaları vardır. Piezo kuvvet ölçer ve piezo ivme ölçerli bir örnek geri tepkime ölçüm sistemi (Şekil 4) de verilmiştir [9].



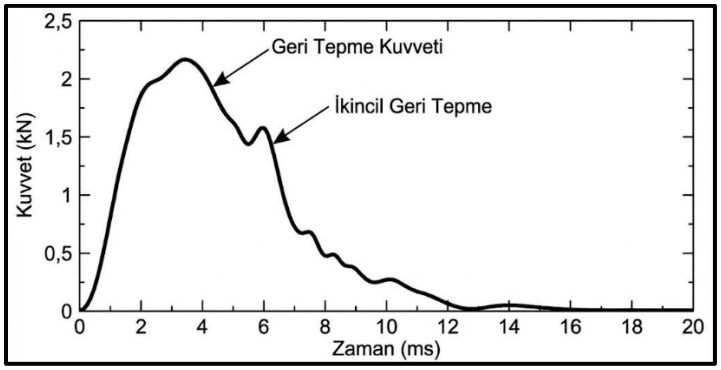
Şekil 4. Piezoelektrik Sensör Montaj Şeması

Piezo sistemin özellikleri olarak, örnekleme frekansı 200 kHz, sistemin kuvvet ölçüm aralığı 0 - 5000 N, kuvvet ölçüm sisteminin hassasiyet: ± % 2-5 ve sistemin gösterge yanıt süresi < 1 µs kullanılmıştır.

Bu sistemde kuvvet sensörü veya yük hücresi ve ivme ölçeri, silahın dipçik ile dipçik kabzası arasına yerleştirilmiştir. Yük hücresi toplam kuvvet değişimi ölçerken, ivmeölçer atalet kuvvetlerini tespit eder. Gerçek geri tepme kuvveti, yük hücresinden ölçülen toplam kuvvetten atalet kuvvetinin çıkarılmasıyla aşağıdaki formül ile elde edilir [9]:

$$F_{gercek} = F_{\text{ölçülen}} - m \cdot \text{a} \qquad (2)$$

Tipik kuvvet ölçüm sensöründen elde edilen kuvvet zaman grafiği (Şekil 5)' te verildiği şekildedir. Bu yöntemin en önemli avantajı olarak, yüksek frekanslı titreşimlerin neden olduğu hataları elimine ederek daha doğru sonuçların elde edilmesi sayılabilir.



Şekil 5. Tipik Geri Tepme Kuvvet-Zaman Grafiği

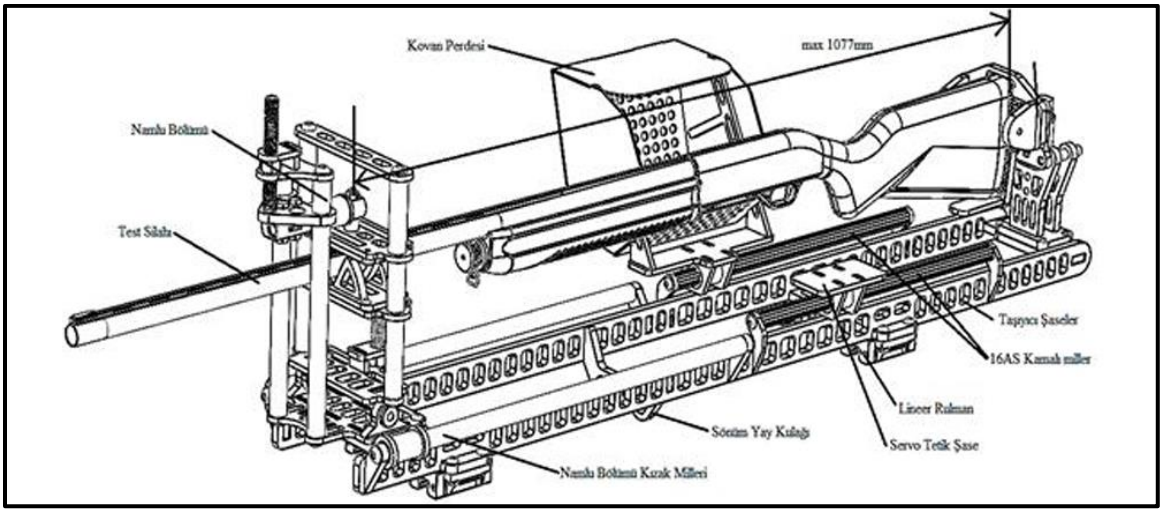
Diğer doğrudan ölçüm yöntemi olarak basınç matrisi sistemleri ile ölçüm yapılabilir. Ölçüm yöntemi olarak, dipçik ile omuz arasındaki temas bölgesinde basınç dağılımını ölçen matris sistemleri kullanılır. Bu sistem avantajları olarak aşağıdaki maddeler sıralanabilir.

- Temas alanı boyunca basınç dağılımı elde edilir
- Maksimum basınç noktaları belirlenir
- Kullanıcı konforu analizi için detaylı veriler elde edilebilir.

Yapılan çalışmalarda bu sistem yaygın olmasına karşın avantajları nedeniyle tercih edilmektedir.

Dolaylı ölçüm yöntemleri için ivme ölçer tabanlı sistemler ile balistik sarkaç yöntemi örnek olarak verilebilir. İvmeölçer tabanlı sistemlerde, akıllı telefon ve özel ivmeölçer sistemleri kullanılarak alternatif geri tepkime kuvveti ölçüm yöntemleri olarak ifade edilir. 3 eksenli özel ivmeölçerler kullanarak sistem üzerinden şu parametreleri ölçebilir: Namlu yükselişi (muzzle rise), Toparlanma süresi (recovery time), Geri tepme açısı, Geri tepme ivmesi parametreleridir. İkinci dolaylı ölçüm yöntemi olan balistik sarkaç yöntemi geri tepme enerjisinin ölçümünde uzun yıllar kullanılmıştır. Bu yöntemde silah, serbestçe sallanabilen bir sarkaç sistemine monte edilir ve ateşleme sonrası sarkacın yükseldiği maksimum açıdan geri tepme enerjisi belirlenir [10].

Geri tepme kuvveti ölçüm sistemlerinden yukarıda verilen 2 gruba dahil olamayan hibrit veya farklı ölçüm sistemleri de kullanılmaktadır. Bu sistemler birden fazla sensör tipinin kombinasyonunu içeren sistemler olarak tanımlanır. Örnek sistemler olarak özel tasarım sensörlü sistemler, yüksek hızlı kameralar ile ölçüm sistemleri, Foto-dedektör yardımı ile ölçüm sistemleri sayılabilir. (Şekil 6)'da özel tasarım bir silah tablası sistemi verilmiştir.



Şekil 6. Özel Tasarım Bir Silah Tablası

Tüm bu geri tepkime kuvveti ölçüm sistemleri birbirlerine göre doğruluk, maliyet, frekans yanıtı ve karmaşıklık açısından kıyaslandığında (Tablo 1)'de verilen sonuçlar elde edilir.

Tablo 1. Geri Tepme Kuvveti Ölçüm Yöntemlerinin Karşılaştırması

Yöntem	**Doğruluk**	**Maliyet**	**Karmaşıklık**	**Frekans Yanıtı**
Piezoelektrik Yük Hücresi	Yüksek (± %2)	Orta-Yüksek	Orta	250 Hz - 10 kHz
Basınç Matrisi	Orta (± %5-10)	Yüksek	Yüksek	< 1 kHz
İvme ölçer	Orta (± %5)	Düşük-Orta	Düşük	< 5 kHz
Balistik Sarkaç	Düşük (± %10-15)	Düşük	Düşük	-

3. GELECEK ARAŞTIRMA YÖNELİMLERİ

Silah sitemlerinin geliştirilmesinde çağın getirdiği yeniliklerin entegrasyonu ile farklı gelişmeler öngörülmektedir. Bunlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Öncelikle çok eksenli sensör sistemlerinin entegrasyonu çalışmaları yapılmaktadır. Gelecekteki sistemlerin, 6 serbestlik derecesinde (3 kuvvet + 3 moment) geri tepme parametrelerini eş zamanlı ölçebilen entegre sensör sistemlerini içerebileceği öngörülmektedir.

İkinci olarak, yapay zekâ destekli analiz sistemlerinin giderek gelişmesi ile bu sistemlerde makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak: Geri tepme davranışlarının otomatik sınıflandırılmasının yapılması, otomatik durum tespiti, Kullanıcıya özel optimizasyon önerilerinin yapılabilmesi ve Tahmine dayalı bakım sistemlerin geliştirilmesinin mümkün olması öngörülmektedir.

Üçüncü olarak, dijital ikiz uygulamalarının gelişimi ile fiziksel silah sistemlerinin dijital ikizlerinin oluşturulması ile gerçek zamanlı simülasyon, optimizasyon ve tasarım doğrulama süreçlerinin hızlandırılması öngörülmektedir.

Dördüncü ve son madde olarak, akıllı malzemelerin geliştirilmesi ile Manyeto-reolojik (MR) sönümleyiciler gibi kontrol edilebilir akıllı malzemelerin entegrasyonu ile adaptif geri tepme kontrolü sistemleri geliştirilebilmesi mümkün olabilecektir [11].

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, hafif silahlarda geri tepme kuvvetinin ölçümü ve bu sistemler arasındaki farklılıklar ile gelecek öngörüleri verilmiştir. Elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

1. Standart Eksikliği: Geri tepme kuvveti ölçümü için uluslararası kabul görmüş bir standart bulunmamaktadır. Farklı araştırmacılar farklı metotlar kullanarak ölçümlerini gerçekleştirmektedir.

2. Ölçüm Yöntem Tercihleri: En güvenilir sonuçlar, piezoelektrik yük hücresi kullanıldığı sistemlerde ± %2 değeri ile elde edilmektedir. Bu sebepten diğer yöntemlere göre bu yöntem tercih edilen yöntemlerden birisidir.

3. Teknolojik Gelişmeler: Yapay zeka, özel sensörler ve dijital ikiz teknolojilerinin entegrasyonu ile gelecekte daha akıllı ve adaptif sistemler geliştirilecektir.

Bu çalışma ile, geri tepme kuvveti ölçümü alanında çalışacak araştırmacılar için bir referans kaynak oluşturulması hedeflemiş ve mevcut yöntemlerin avantaj-dezavantajlarını ortaya koymuştur.

KAYNAKÇA

[1] Tuncer, D. G. (2019), Ağır Silahlardaki Geri Tepme Mekanizmalarının Dinamik Modellenmesi ve Sayısal Benzetimi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, Türkiye, s. 18–23.

[2] İlter. (2021), Geri Tepme Kuvvetlerinin Yivli ve Yivsiz Tüfeklerde Ölçümü, Analizi ve Karşılaştırması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, s. 45–47.

[3] Batmaz. (2022), Hafif Silahlarda Geri Tepme Sönümleyici Sistem Tasarımı ve Performans Özelliklerinin Nümerik Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Giresun, Türkiye, s. 23–25.

[4] Canlı, A. (2023), Silah Sistemleri İçin Geri Tepme Sönümleyici Mekanizma Modellemesi ve Optimizasyon Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye, s. 27–28.

[5] Zhang, J., Liu, Y., Yang, Q., ve Wang, Z. (2024), Research on Automatic Shotgun Recoil Reduction Method and Recoil Force Test, Journal of Ballistics Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 5– 9.

[6] Koç, O. ve Tınkır, M. (2023), Silah Geri Tepme ve Şahlanma Test Makinası Tasarımı ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, s. 224–226.

[7] Stiefel, L. (1988). "Gun Propulsion Technology," Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 109, AIAA.

[8] Carlucci, D. E., & Jacobson, S. S. (2007). "Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition," CRC Press.

[9] Paone, M., & Vita, L. (2014). "Measurement of firing impulse force in rifles," Proceedings of ISMA2014, Leuven, Belgium, pp. 3349-3359.

[10] SAAMI (2021). "Recoil Formulas and Free Recoil Energy of Sporting Arms," Sporting Arms and Ammunition Manufacturers' Institute

[11] Batterbee, D. C., Sims, N. D., Stanway, R., & Wolejsza, Z. (2007). "Magnetorheological landing gear: A design methodology," Smart Materials and Structures, 16(6), 2429-2440

OTONOM HAVA ARAÇLARI İÇİN GÜVENLİ VE VERİMLİ ROTA PLANLAMASINDA DAĞITIK PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU

ALPASLAN TETIK
Yıldız Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Aviyonik Mühendisliği
alpaslantetik51@gmail.com, ORCID: 0009-0001-1495-0803

Doç Dr. YAVUZ EREN
Yıldız Teknik Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Fakültesi / Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği
yeren@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9128-2856

Özet

Otonom hava araçlarının görevlerini güvenli ve etkin biçimde yerine getirebilmesi, rota planlama sürecinde güvenli navigasyon ve operasyonel verimlilik hedefleri arasında dengeli bir optimizasyon yaklaşımının uygulanmasını gerektirir. Bu kapsamda, statik engellerle çevrili üç boyutlu bir görev sahasında, hava aracının engellerden güvenli şekilde kaçınırken toplam uçuş mesafesini minimize etmesini sağlayacak bir rota planlama yöntemi geliştirilmiştir. Çift amaçlı optimizasyon problemi, toplam rota uzunluğu ile engel ihlali cezalarını birleştiren bileşik bir amaç fonksiyonu ile modellenmiş ve çözüm, aynı anda çalışan birden fazla Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlgili model sayesinde farklı PSO sürüleri aynı anda bağımsız arama bölgelerinde çalışarak çözüm çeşitliliğini artırmakta ve global optimuma ulaşma olasılığını yükseltmektedir. Başlangıç aşamasında belirli bir mesafeye kadar açısal alan kısıtlaması uygulanarak her sürü farklı yönlerde arama yapacak şekilde yönlendirilmiş, böylece arama uzayının daha geniş bir kısmı etkin biçimde taranmıştır. Dağıtık biçimde çalışan sürüler, kendi arama süreçlerini tamamladıktan sonra birleştirilmiş ve rotalar arasındaki kıyaslama sonucunda en kısa rota seçilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin güvenlik ve mesafe optimizasyonu arasında başarılı bir denge kurduğunu, hesaplama süresi açısından verimli çalıştığını ve kısa, güvenli, uygulanabilir rotalar ürettiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: PSO, DPSO, İHA, Hava Aracı

DISTRIBUTED PARTICLE SWARM OPTIMIZATION FOR SAFE AND EFFICIENT PATH PLANNING OF AUTONOMOUS AERIAL VEHICLES

Abstracts

Ensuring safe and efficient mission execution for autonomous aerial vehicles requires balanced optimization between navigation safety and operational efficiency during route planning. A route planning method is developed to enable the vehicle to safely avoid static obstacles while minimizing total flight distance within a three-dimensional mission area. The bi-objective optimization problem is formulated using a composite objective function that combines route length and obstacle violation penalties, and solved through multiple Particle Swarm Optimization (PSO) algorithms running in parallel. The parallel structure allows different PSO swarms to explore independent regions simultaneously, increasing solution diversity and improving the likelihood of reaching the global optimum. Initially, an angular region constraint is applied up to a certain distance, directing each swarm toward different search directions and expanding the explored space. After completing their respective searches, the parallel PSO swarms are integrated, and the shortest route is selected through comparative evaluation. Simulation results show that the proposed method achieves a strong balance between safety and distance optimization, operates efficiently in computation time, and produces short, safe, feasible flight paths suitable for real-world autonomous missions.

Keywords: PSO, DPSO, UAV, Aircraft

1. GİRİŞ

Otonom hava araçları (OHA), insansız görevleri yerine getirme kapasitesi, esnekliği ve düşük operasyonel maliyetleri sayesinde savunma, sivil ve ticari alanlarda giderek yaygınlaşmaktadır. Bu araçlar, keşif, gözetleme, kargo taşımacılığı ve acil durum müdahaleleri gibi görevlerde insan müdahalesini azaltarak hem güvenliği artırmakta hem de operasyonel verimliliği yükseltmektedir (Shakhatreh ve ark., 2019). Ancak, OHA'ların etkin ve güvenli çalışabilmesi yalnızca donanım ve sensör performansına değil, aynı zamanda doğru ve verimli rota planlamasına bağlıdır. Karmaşık, dinamik ve engellerle dolu üç boyutlu görev sahalarında, hava aracının güvenli bir rota takip etmesi, görev başarısını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür ve navigasyon hataları ciddi operasyonel riskler doğurabilir (Merei ve ark., 2025).

Rota planlama problemleri, çok sayıda değişken ve kısıtı dikkate almayı gerektiren çok amaçlı optimizasyon problemleridir. Bu problemler genellikle uçuş mesafesinin minimize edilmesi, engellerden kaçınma, enerji tüketiminin optimize edilmesi ve görev süresinin kısaltılması gibi çelişkili hedefleri içerir. (Yuan ve ark., 2025) Ayrıca, gerçek zamanlı uygulamalarda çözümün hesaplama süresinin kısa olması, yöntemin pratik uygulanabilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

PSO, biyolojik sürü davranışlarından esinlenen ve çok amaçlı optimizasyon problemlerinde yaygın olarak kullanılan etkili bir yöntemdir (Kennedy ve Eberhart, 1995). PSO'da çözüm adayları "parçacık" olarak temsil edilir ve her parçacık, kendi deneyimi ile sürü içerisindeki diğer parçacıkların en iyi konumlarını dikkate alarak konumunu günceller. Bu mekanizma, algoritmanın global optimuma hızlı ve etkin bir şekilde yaklaşmasını sağlar. Önceki çalışmalarda, sürünün evrimsel durumu değerlendirilerek algoritma parametreleri dinamik olarak ayarlanmış ve algoritmanın keşif veya sömürü gibi farklı arama aşamalarına adaptif olarak tepki vermesi sağlanmıştır (Zhan ve ark., 2009). Çalışmamız kapsamında irtifa amaç fonksiyonu dinamik olarak hedef noktaya göre kendini güncellemekte, böylece rota hesaplamaları görev alanına ve çevresel koşullara göre optimize edilmektedir.

PSO algoritmasının kullanımı sırasında gerçek zamanlılığın sağlanması için PSO, paralel yürütme stratejileri ile birleştirilmiş ve "tek program, çoklu veri" paradigması kullanılarak çözüm süresi kısaltılmış, standart ticari çok çekirdekli işlem birimlerinde gerçek zamanlı performans elde edilmiştir (Roberge ve ark., 2013). Bu araştırmada da paralel olarak birden fazla PSO algoritması çalıştırılarak hem performans kazanımı sağlanmakta hem de yönlendirilmiş PSO algoritmaları çözüm doğruluğu artırılmaktadır.

PSO algoritmasında bulunan parçacıklar yerel olarak minimum değerlerde kalıp hedefe ulaşamayabilirler daha önce yapılan çalışmalar da yerel minimum değerlerden kurtulmak amacıyla bazı parçacıklar mutasyona uğratılarak farklı konumlara taşınmıştır (Ahmed ve ark., 2020). Benzer şekilde bu çalışmada da parçacıklar durağanlaştıklarında, parçacık hızları mutasyona uğratılarak yerel minimumlardan uzaklaşmaları sağlanır. Bir diğer çalışmada ise holonik yapı kullanılmıştır. Holonik yapıda parçacıklar, farklı gruplara veya "holonlara" ayrılır ve bu gruplar birbirleriyle iletişim kurarak bilgi paylaşır; bu, yerel optimumlara takılma riskini azaltır ve arama sürecinde çeşitliliği artırır (Roshanzamir ve ark., 2017). Önerilen yaklaşımda ise, dağıtık PSO sürüleri tamamen bağımsız gruplar olarak koordine edilmekte ve başlangıçta farklı açısal alanlar ile limitlemektedir. Böylece gruplar birbirlerinden etkilenmeden arama alanını etkin şekilde tarayarak daha güvenilir ve doğru çözümler elde etmektedir.

Bu makale, karmaşık ve engellerle dolu görev sahalarında otonom hava araçlarının güvenli, kısa ve etkin rotalar planlayabilmesi için dağıtık PSO tabanlı bir optimizasyon yaklaşımının uygulanabilirliğini ve etkinliğini incelemeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, paralel yapı, dinamik amaç fonksiyonu ve bağımsız sürülerin birleştirilmesi gibi yenilikçi yöntemler ile hem hesaplama performansı hem de çözüm doğruluğu artırılmaktadır. Bu yönüyle makale, otonom hava araçları için gerçek zamanlı ve güvenilir rota planlama stratejilerine katkı sağlamaktadır.

2. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde, önerilen yöntemin temel bileşenleri ve uygulama adımları açıklanmıştır. Öncelikle optimizasyon probleminin tanımı yapılmış, ardından PSO algoritmasının yapısı, paralel hesaplama yaklaşımı ve hız mutasyonu yöntemi sunulmuştur. Son olarak, önerilen modelin performansını değerlendirmek için kullanılan simülasyon ortamı ve test senaryoları özetlenmiştir.

2.1. Problem Tanımı

Otonom hava araçlarının üç boyutlu görev sahasında güvenli ve etkin uçuş gerçekleştirebilmesi hem engellerden kaçınmayı hem de toplam uçuş mesafesini minimize etmeyi gerektirir. Bu, çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak ifade edilebilir. Hedef, hava aracının başlangıç noktasından hedef noktaya ulaşırken karşılaşabileceği statik engeller, uçuş alanı kısıtları ve diğer operasyonel sınırları dikkate alarak en uygun rotayı belirlemektir.

$$x_i = \{\ x_i^x, x_i^y, x_i^z\},\ \ i = 1, 2, 3 \dots, n \tag{1}$$

$$X = \{\ x_1,\ x_2, \dots,\ x_n\} \tag{2}$$

Rota (2) denkleminde gösterildiği üzere n adet ara noktadan oluşur ve (1) numaralı denklemde gösterildiği gibi üç boyutlu koordinatları içerir.

$$F(X) = w_1 L_{xy}(X) + w_2 L_z(X) + w_3 C(X) + w_4 R_f(X) \tag{3}$$

$$L_{xy}(X) = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{\left(x_{i+1}^x - x_i^x\right)^2 + \left(x_{i+1}^y - x_i^y\right)^2} \tag{4}$$

$$L_z(X) = \begin{cases} \dfrac{\left(\frac{z_{max} - x_g^z}{d_{alc}}\right)\sqrt{\left(x_{i+1}^x - x_i^x\right)^2 + \left(x_{i+1}^y - x_i^y\right)^2} + z_{g+}\, z_i}{z_{\lim}}, & d_i < d_{alc}, Limitli\ alan\ başladı, x_i^z < z_{max} \\ 1, & d_i < d_{alc}, Limitli\ alan\ başladı, x_i^z > z_{max} \\ 2, & eğer\ z_i \geq z_{max} \end{cases} \tag{5}$$

$$C(X) = \sum_{i=1}^{n} f_{obs}(x_i),\ \ f_{obs}(x_i) = \begin{cases} 0, & eğer\ x_i\ engel\ dışında\ ise \\ P_i, & eğer\ x_i\ engel\ ile\ çakışıyorsa \end{cases} \tag{6}$$

$$R_f(X) = \sum_{i=1}^{n} f_{for}(x_i),\ \ f_{for}(x_i) = \begin{cases} 0, & eğer\ x_i\ yasaklı\ bölge\ dışında\ ise \\ P_i, & eğer\ x_i\ yasaklı\ bölge\ ile\ çakışıyorsa \end{cases} \tag{7}$$

Bu çalışmada rota optimizasyon problemi, dört bileşenden oluşan bir toplam maliyet fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Denklem (3)'te görüldüğü üzere, amaç fonksiyonu yatay mesafe $L_{xy}(X)$, irtifa farkı $L_z(X)$, çarpışma durumu $C(X)$ve yasaklı bölge kontrolü $R_f(X)$ terimlerinin ağırlıklı toplamından oluşur.

Denklem (4)'teki $L_{xy}(X)$terimi, rota boyunca x–y düzleminde kat edilen toplam yatay mesafeyi ifade eder. Denklem (5)'te tanımlanan $L_z(X)$ terimi, rota boyunca parçacığın dikey hareketini (irtifa profilini) kontrol eder. Bu terim, alçalma bölgesine (d_{alc}) yaklaşıldığında, parçacığın maksimum izin verilen irtifasını doğrusal bir şekilde düşürerek hedefe güvenli bir şekilde yaklaşmasını sağlar. Böylece parçacıklar, hem hedef irtifasına uygun hareket eder hem de belirlenen irtifa sınırlarını aşmaz. Eğer parçacık alçalma bölgesine girmemişse veya mevcut irtifa maksimum izin verilen sınırı aşmışsa, uygunluk değeri basit bir şekilde 1 veya 2 olarak atanır; bu sayede hareketin dikey bileşeni, diğer rota bileşenlerinden bağımsız ve güvenli bir şekilde değerlendirilir.

Denklem (6) ile tanımlanan $C(X)$, her noktanın engel bölgesiyle çakışma durumunu kontrol eder; engel dışı konumlarda ceza değeri sıfır, çakışma durumunda ise $P_i$olarak atanır. Benzer şekilde, Denklem (7)'deki $R_f(X)$fonksiyonu da aracın yasaklı bölgeye girmesini önler.

Sonuç olarak, bileşik amaç fonksiyonu $F(X)$ güvenli, kısa ve enerji açısından verimli bir uçuş rotasının elde edilmesini sağlar. Her bir çözüm adayı bu fonksiyonun değeri üzerinden değerlendirilerek optimize edilir.

2.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması

Parçacık Sürü Optimizasyonu, doğadan esinlenen sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır ve Kennedy ile Eberhart tarafından 1995 yılında geliştirilmiştir. Algoritma, bir çözüm uzayında hareket eden parçacıklardan oluşan bir sürü mantığına dayanır. Her bir parçacık, problemin olası bir çözümünü temsil eder ve konumu X_i, hızı $V_i$ile sürekli olarak güncellenir.

Her iterasyonda parçacıklar hem kendi en iyi konumlarını ($pbest_i$) hem de sürü genelindeki en iyi konumu ($gbest$) dikkate alarak hareket eder. Güncelleme işlemi denklem (8) ve (9) ile tanımlanmıştır.

$$V_i^{t+1} = wV_i^t + c_1 r_1 (pbest_i - X_i^t) + c_2 r_2 (gbest - X_i^t) \quad (8)$$

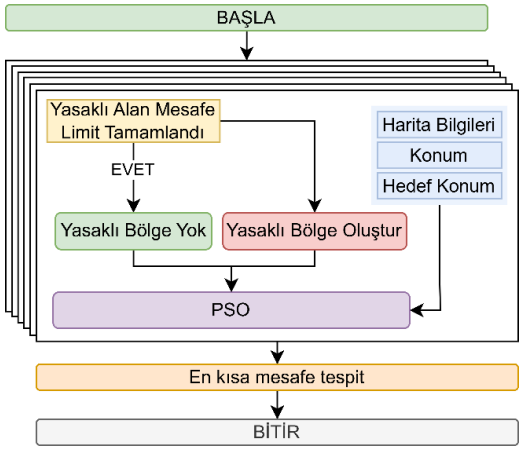
$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (9)$$

Denklem (8)'de yer alan ω parametresi, parçacığın mevcut hızını koruma eğilimini belirleyen atalet katsayısıdır ve arama sürecinde dengeyi sağlar. Daha yüksek ωdeğerleri arama uzayında keşif (exploration) kabiliyetini artırırken, düşük değerler çözümün yerel arama (exploitation) yönünü güçlendirir. Katsayılar $c_1$ve c_2sırasıyla bireysel öğrenme (kişisel en iyi konuma yönelim) ve sosyal öğrenme (sürüdeki en iyi konuma yönelim) bileşenlerini temsil eder. Bu katsayılar genellikle 1,5 ile 2,5 arasında seçilir ve arama sürecinde parçacıkların keşif ve yakınsama davranışlarını dengelemek amacıyla deneysel olarak belirlenir. Rastgele katsayılar $r_1$ve $r_2$ise 0 ile 1 arasında üretilen değerler olup, her iterasyonda parçacık hareketlerine stokastik (olasılıksal) bir bileşen kazandırır. Böylece, sürü zamana bağlı olarak çözüm uzayında hem yeni bölgeleri keşfeder hem de mevcut iyi çözümlere yönelir.

Denklem (9), parçacığın bir sonraki konumunun (X_i^{t+1}), mevcut konumu ile güncellenen hızı (V_i^{t+1}) toplamı olarak belirlendiğini gösterir. Böylece her iterasyonda parçacıklar hem kendi deneyimlerinden hem de sürünün ortak bilgisinden etkilenerek çözüm uzayında dinamik biçimde hareket eder.

2.3. Dağıtık PSO Yapısı (DPSO)

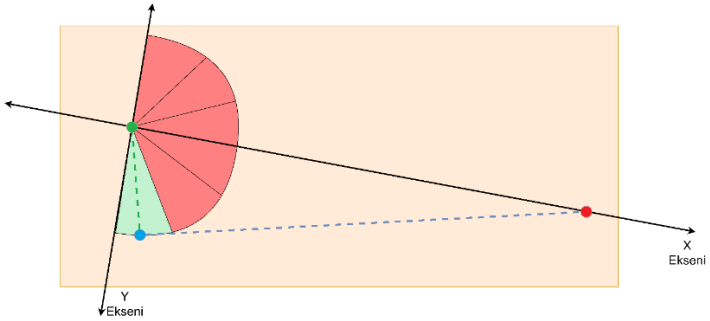
Klasik PSO algoritması, özellikle çok engelli ortamlarda rota planlaması yaparken erken yakınsamaya eğilimlidir. Parçacıklar kısa sürede benzer bölgelerde yoğunlaşarak global en iyi çözüme ulaşamadan yerel minimumlarda sıkışabilir. Bu sorunu azaltmak için Şekil-1 ile gösterilen paralel çalışan birden fazla PSO süreci tasarlanmıştır.



Şekil 1. Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu

Tasarlanan bu yapı, her PSO sürecinin başlangıçta farklı yönelimlere sahip olacak şekilde sınırlandırılması prensibine dayanır. Şekil 2 ile gösterildiği gibi başlangıç noktası çevresinde belirli bir yarıçap içinde bir açısal kısıtlama bölgesi tanımlanır ve yeni bir hedef noktası belirlenir. Bu bölge içinde parçacıkların yalnızca belirli bir açı aralığında (örneğin 60°–90°) hareket etmesine izin verilir; bu aralık dışındaki yönelimler yasaklı alan olarak değerlendirilir ve her paralel çalışan PSO için farklıdır. Bunun yanında kısıtlama sadece x ve y düzleminde geçerlidir. Yani yatay yönelimi etkiler, ancak irtifa (z ekseni) üzerinde herhangi bir sınırlama uygulanmaz. Açısal kısıtlamanın amacı, her PSO sürecini başlangıçta farklı bir yöne yönlendirmek ve arama uzayında çeşitlilik sağlamaktır.

Açısal kısıt yalnızca belirlenen yarıçap içinde aktif olduğundan, bu bölge aşıldığında parçacıklar serbest hale gelir ve algoritma klasik PSO formunda çalışmaya devam eder. Böylece süreç, başlangıçta farklı yönlere dağılmış olsa da daha sonra tüm çözüm uzayını özgürce keşfeder. Her paralel PSO süreci, kendi açısal yönelimiyle başlatılır ve optimizasyon sonunda bağımsız bir rota adayı üretir. Bu rotalar, minimum mesafe kriterine göre karşılaştırılır ve en kısa rota en uygun çözüm olarak seçilir.



Şekil 2. Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu Açı Bazlı Kısıt Bölgesi

Bu yöntem, farklı yönelimlere sahip PSO süreçlerinin paralel olarak çalışması sayesinde erken yakınsama riskini azaltır, arama uzayının daha geniş bir kısmının keşfedilmesini sağlar ve sonuçta daha dengeli, kısa ve güvenli bir rota elde edilmesine katkı sunar.

2.4. Parçacık Hız Mutasyonu

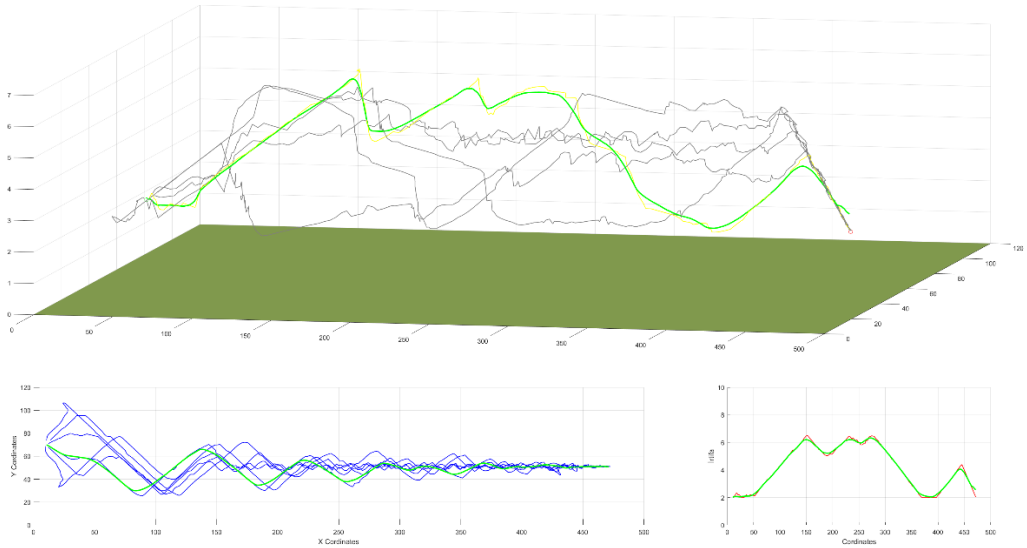
Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmalarında, parçacıklar arama uzayında global en iyi çözüme (g_{best}) yaklaştıkça, hız vektörleri birbirine yakınlaşır ve çeşitlilik azalır. Bu durum, algoritmanın yerel minimumlarda sıkışmasına neden olabilir. Bu problemi önlemek amacıyla, tüm yönlerdeki parçacık hızları dinamik olarak izlenir ve denklem (10) ile gösterildiği gibi belirli bir minimum hız eşiği ($v_{\min}$) ile kontrol edilir. Eğer bir parçacığın hızı bu eşikten küçükse, parçacığa rastgele bir hız değeri atanır. Böylece parçacıkların arama uzayındaki hareket çeşitliliği korunur ve global optimuma ulaşma olasılığı artar.

$$v_i(t+1) = \begin{cases} v_i(t) & , \; eğer \; ||v_i(t)|| \geq v_{min} \\ v_{rand} & , \; eğer \; ||v_i(t)|| < v_{min} \end{cases} \tag{10}$$

Burada $\mathbf{v}_i(t)$ i-inci parçacığın $t$iterasyonundaki hız vektörü, $\mathrm{v}_{\mathrm{rand}}$ rastgele atanmış hız vektörünü temsil etmektedir. Bu yaklaşım, parçacıkların hem keşif hem de sömürü davranışlarını dengeler, yerel minimumlardan kaçınmayı kolaylaştırır ve algoritmanın global optimuma erişme performansını iyileştirir.

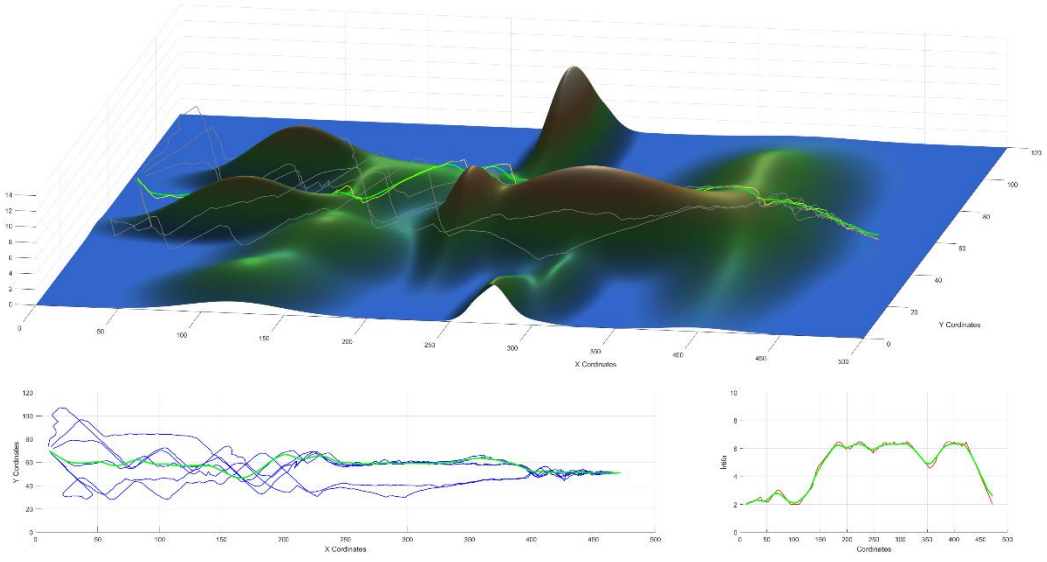
2.5. Simülasyon Ortamı ve Test Senaryoları

Bu bölümde, önerilen yöntemlerin performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen iki farklı simülasyon senaryosu sunulmaktadır. Simülasyonlar, MATLAB® ortamında oluşturulan üç boyutlu bir harita üzerinde gerçekleştirilmiş, hava aracı noktasal bir model olarak konumlandırılmıştır. Hesaplanan konum bilgilerine göre araç, tanımlı limitler dâhilinde hareket ettirilmiştir. PSO tabanlı algoritmaların işlem verimliliğini artırmak için MATLAB®-Paralel İşleme Araç Kutusu kullanılarak paralel işlem yapısı uygulanmıştır.



Şekil 3. Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu Engelsiz Rota Tespit

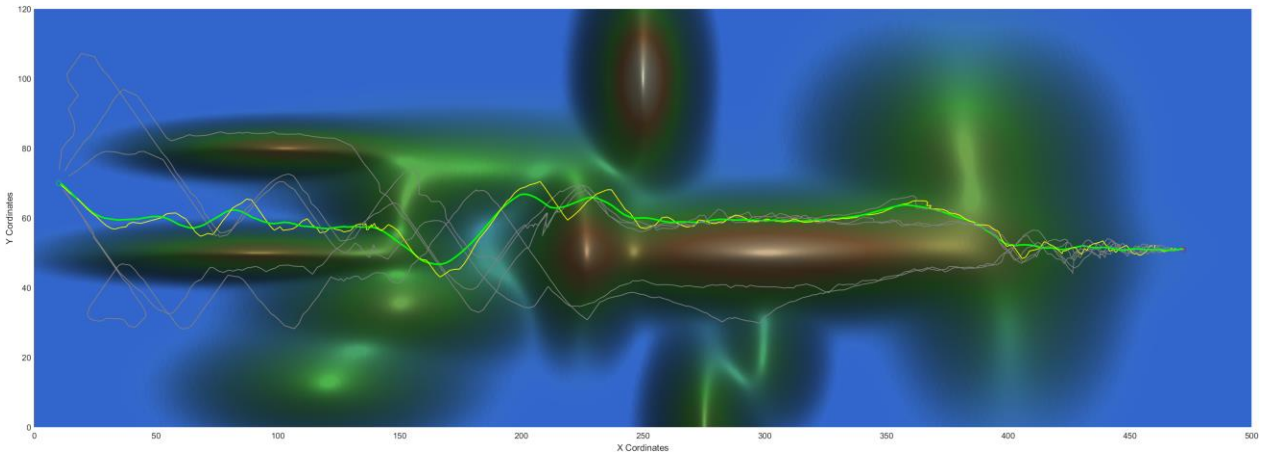
Şekil 3 ile engelsiz düz uçuş senaryosu gösterilmiştir. Başlangıçta farklı yönlere yönlendirilen PSO algoritmaları açısal kısıtları doğru bir şekilde takip ettiği görülmüştür. Herhangi bir engel olmadığı için hedefe yönelim sadece amaç fonksiyonunda bulunan $L_{xy}(X)$ parametresine göre yapılmıştır. Bundan dolayı PSO algoritması dalgalanarak hedefi takip etmiştir. Hedef konuma yaklaştığında ise alçalış eğrisine göre hedef konuma ulaşmıştır.



Şekil 4. Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu Rota Tespit-1

Şekil 4, MATLAB® ortamında paralel işlem kullanılarak eşzamanlı şekilde yürütülen PSO algoritmalarının engelli uçuş senaryosundaki davranışını göstermektedir. Bu senaryoda, farklı başlangıç koşullarına sahip parçacık sürüleri

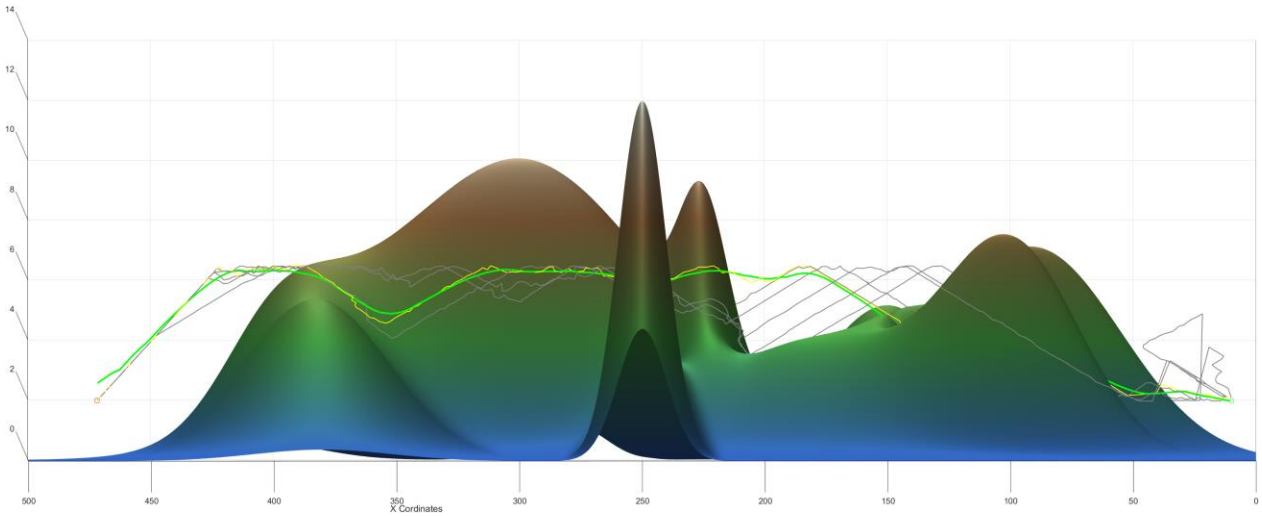
bağımsız olarak çalıştırılmış ve olası yerel minimum noktalarından kaçınmak amacıyla hız mutasyonu mekanizması uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, dağıtık PSO yapısının algoritmaların yerel minimumlara takılmadan alternatif güzergâhlar oluşturmasını sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, minimum maliyetli rota doğru bir şekilde belirlenmiş ve hava aracının bu optimum rotayı başarılı bir biçimde takip ettiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu Rota Tespit-2

Şekil 5, paralel PSO algoritmalarının açısal kısıtlar çerçevesinde hareket ettiğini ve haritanın farklı bölgelerinde bağımsız olarak konumlandığını göstermektedir. Bu durum, algoritmanın küresel arama kabiliyetini koruyarak çözüm uzayını etkin bir biçimde taradığını doğrulamaktadır.

Şekil 6'da ise, hava aracının alçalma bölgesine girişine kadar irtifa parametresinde herhangi bir sınırlama olmaksızın konum bazlı hareket ettiği görülmektedir. Alçalma sınırına ulaşıldığında, sistem hedeflenen irtifaya kontrollü bir şekilde alçalmış ve uçuşu hedef noktada sonlandırmıştır. Ayrıca, hava aracının maksimum irtifa değerini aşmadığı ve sistemin uçuş boyunca güvenli irtifa sınırları içinde kaldığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, önerilen paralel PSO yapısının hem konum hem de irtifa kontrolünde kararlı ve etkin bir performans sergilediğini göstermektedir.



Şekil 6. Dağıtık Parçacık Sürü Optimizasyonu Rota Tespit-3

3. SONUÇ

Bu makalede, otonom hava araçlarının üç boyutlu ve engellerle dolu görev sahalarında güvenli ve kısa rotalar planlayabilmesi için dağıtık PSO tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Başlangıçta farklı açısal yönelimlerle başlatılan dağıtık PSO sürüleri, arama uzayını etkin biçimde taramış ve her sürü bağımsız rota adayları üretmiştir. Dinamik irtifa katsayısı güncellemesi, parçacıkların yerel minimumlara takılmasını önlemiş ve keşif–kullanım dengesini güçlendirmiştir. Benzetim çalışmaları, yöntemin hem güvenliği hem de mesafe optimizasyonunu başarıyla dengelediğini, erken yakınsamayı önlediğini ve kısa, uygulanabilir rotalar ürettiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, otonom hava araçları için gerçek zamanlı ve güvenilir rota planlamaya güçlü bir temel sunmaktadır.

4. TARTIŞMA

Bu çalışma, otonom hava araçlarının üç boyutlu görev sahalarında güvenli ve kısa rotalar planlamasında dağıtık PSO yaklaşımının etkinliğini ortaya koymaktadır. Başlangıç açısal kısıtlamaları ve paralel sürü yapısı, arama uzayında çeşitliliği artırarak parçacıkların erken yakınsamaya takılma riskini azaltmış ve bağımsız rota adaylarının üretilmesini sağlamıştır. İrtifa amaç fonksiyonunun dinamik olarak güncellenmesi, parçacıkların farklı irtifa düzlemlerinde keşif yapabilmesine olanak tanımış ve daha dengeli, güvenli çözümler elde edilmesini sağlamıştır. Öte yandan, paralel yürütme ve birden fazla PSO sürüsünün eş zamanlı çalışması, çözüm doğruluğunu artırırken işlem gücü ihtiyacını yükseltmekte ve özellikle sınırlı donanım kaynaklarında performans kısıtları ortaya çıkarmaktadır. Bu durum, yöntem uygulanırken işlem gücünün göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir. Sonuç olarak, dağıtık PSO tabanlı yaklaşım, güvenilir ve kısa rotalar üreten güçlü bir strateji sunmakta, açısal kısıtlamalar ve paralel yapı çözüm çeşitliliğini artırmakta, ancak işlem gücü yükü dikkate alınması gereken bir sınırlılık olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

AHMED, G., SHELTAMI, T., MAHMOUD, A., YASAR, A. (2020), IoD Swarms Collision Avoidance via Improved Particle Swarm Optimization, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 142, 260-278.

KENNEDY, J., EBERHART, R. (1995), Particle swarm optimization, *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*.

MEREI, A., MCHEICK, H., GHADDAR, A., REBAINE, D. (2025), A Survey on Obstacle Detection and Avoidance Methods for UAVs*, Drones,* 9(3), 203.

ROBERGE, V., TARBOUCHI, M., LABONTÉ G. (2013), Comparison of Parallel Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Real-Time UAV Path Planning, *IEEE Transactions On Industrial Informatics*, 9(1), 132-141.

ROSHANZAMIR, M., BALAFAR, M., RAZAVI, S. (2017), Empowering particle swarm optimization algorithm using multi agents' capability: A holonic approach, *Knowledge-Based Systems*, 136, 58-74.

SHAKHATREH, H., SAWALMEH, A., AL-FUQAHA, A., DOU, Z., ALMAITA, E., KHALIL, I. (2019), Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges*, IEEE Access,*7, 48572-48634.

YUAN, Y., XU, H., LI, Y., TANG, C. (2025), Multi-Objective Emergency Path Planning Based on Improved Nondominant Sorting Genetic Algorithm*, Symmetry,*17(11), 1818.

ZHAN, Z., ZHANG, J., LI, Y., CHUNG, H. (2009), Adaptive Particle Swarm Optimization, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 39(6), 1362-1381.

BIRD STRIKE ANALYSIS OF FUSELAGE SUSPENSION EQUIPMENT: A COMPARATIVE STUDY

CELAL TUĞRUL AY
Ankara Yıldırım Beyazıt University, Institute of Natural Sciences, Defense Technologies Ankara,Turkey
ay.celaltugrul@gmail.com

Abstract

The aim of this thesis is to investigate the types of payload integration for aircraft and the varieties of suspension equipment used in such integrations, and to assess whether bird strike resistance should be considered as a selection criterion when choosing suspension equipment for integrating a reconnaissance pod on the fuselage station of a multi-role fighter aircraft. Accordingly, two suspension equipment alternatives were evaluated: the centerline pylon and the centerline adapter. The pylon, through its internal sling and auxiliary subsystems, ensures the safe carriage of the payload and allows its release when required. The adapter, in contrast, serves solely to securely carry the payload without providing any release functionality.

Bird strike constitutes a critical threat to both the aircraft and its suspension equipment. Therefore, suspension equipment systems, like other structural components, must maintain their primary functions following impact. According to requirements of MIL-HDBK-516C, the pylon is expected to preserve both carriage and release functions, while the adapter must sustain its carriage capability without interruption. For the analyses, the bird model was defined based on the EN-SB-12-002 Bird Strike Database with a mass of 1,82 kg and an impact velocity of 180 m/s, and modelled using the SPH method. Both the pylon and adapter were assigned Al 7075-T6 material, and the Johnson–Cook material model was applied. This approach eliminated material differences, allowing the effects of geometric design variations on structural performance to be evaluated.

In the initial analyses, stresses exceeding the material limits and fractures were observed on the leading surfaces of both structures. Therefore, the leading surfaces were reinforced, and the analyses were repeated. In the revised configuration, stresses remained below the yield limit, deformations occurred within the elastic range, and structural integrity was preserved.

As a result, reinforcing the leading surfaces provides sufficient bird strike resistance for both the pylon and the adapter. Therefore, selecting the pylon or adapter for reconnaissance pod integration need not be based on bird strike resistance. The optimal suspension equipment should instead be determined according to the operational requirements of the payloads intended for the respective station.

Keywords: Aircraft, Payload Integration, Suspension Equipment, Adapter, Pylon, Bird Strike Analysis

GÖVDE ASKI EKİPMANLARININ KUŞ ÇARPMASI ANALİZİ: KARŞILAŞTIRMALI BİR ÇALIŞMA

Özet

Bu tezin amacı, hava araçlarına yönelik faydalı yük entegrasyon türlerini ve bu entegrasyonlarda kullanılan askı ekipmanı çeşitlerini incelemek ve çok rollü bir savaş uçağının gövde istasyonuna bir keşif podu entegrasyonu için askı ekipmanı seçilirken kuş çarpması dayanımının bir seçim kriteri olarak değerlendirilip değerlendirilmeyeceğini ortaya koymaktır. Bu kapsamda iki askı ekipmanı alternatifi değerlendirilmiştir: gövde-altı pilon ve gövde-altı adaptör. Pilon, bünyesinde barındırdığı salan ve yardımcı alt sistemler aracılığıyla faydalı yükün güvenli bir şekilde taşınmasını ve gerektiğinde hava aracından ayrılmasını sağlar.

Buna karşılık adaptör, yalnızca faydalı yükün güvenli bir şekilde taşınmasını sağlayan ve herhangi bir bırakma fonksiyonu bulunmayan bir askı ekipmanıdır.

Kuş çarpması hem hava aracı hem de askı ekipmanları için kritik bir tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle, askı ekipmanlarının da diğer yapısal bileşenler gibi çarpma sonrası temel fonksiyonlarını yerine getirmeye devam etmesi gerekmektedir. MIL-HDBK-516C gereksinimlerine göre, pilonun hem taşıma hem de bırakma fonksiyonlarını koruması, adaptörün ise taşıma fonksiyonunu kesintisiz şekilde sürdürebilmesi beklenmektedir. Analizlerde kullanılacak kuş modeli, EN-SB-12-002 Kuş Çarpması verileri referans alınarak 1,82 kg kütle ve 180 m/s çarpma hızı ile tanımlanmış ve SPH yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Hem pilon hem de adaptör için Al 7075-T6 malzemesi atanmış ve Johnson Cook malzeme modeli uygulanmıştır. Böylece, malzeme kaynaklı farklılıklar ortadan kaldırılarak geometrik tasarım değişimlerinin yapısal performans üzerindeki etkileri değerlendirilebilmiştir.

İlk analizlerde her iki yapının ön yüzeylerinde malzeme limitlerini aşan gerilmeler ve kırılmalar gözlemlenmiştir. Bu nedenle ön yüzeylerde güçlendirme yapılmış ve analizler tekrar edilmiştir. Revize edilen konfigürasyonda gerilmelerin akma sınırının altında kaldığı, deformasyonların elastik bölgede gerçekleştiği ve yapısal bütünlüğün korunduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, ön yüzeyin güçlendirilmesi hem pilon hem de adaptör için yeterli düzeyde kuş çarpması dayanımı sağlamaktadır. Bu nedenle, keşif podunun entegrasyonunda pilon veya adaptör seçiminin kuş çarpması dayanımına göre yapılmasına gerek bulunmamaktadır. İlgili istasyonda hangi faydalı yüklerin kullanılmasının planlandığı göz önünde bulundurularak operasyonel gereksinimlere en uygun askı ekipmanının seçilmesi daha doğru olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Hava Aracı, Faydalı Yük Entegrasyonu, Askı Ekipmanı, Adaptör, Pilon, Kuş Çarpması Analizi

1. INTRODUCTION

Aircraft payload integration can be performed externally, conformally, or internally. During the design phase, the appropriate integration type is selected based on the mission profile of the aircraft, and the design of the corresponding weapon or payload stations is developed accordingly. In particular, conformal and internal integration types directly affect the internal volume of the aircraft; therefore, these decisions must be made in the early stages of design. Otherwise, late modifications could result in significantly increased costs and design challenges.

Suspension equipment is designed to interface between the payload and the aircraft platform, ensuring secure carriage and, where applicable, release of the payload. The function of suspension equipment may vary depending on its type, the payload it carries, and in some cases, the specific aircraft in which it is installed.

Commonly used suspension equipment for payload integration includes pylons, launchers, and adapters. The pylon, through its internal sling and auxiliary subsystem components, ensures the secure transport of the payload and allows its safe release when required. Launchers, with their rail design, enable the carriage and controlled release of air-to-air and air-to-ground missiles. The adapter is used solely to secure the payload and is typically employed when the payload is not intended to be released from the aircraft. The design of these suspension systems generally varies according to the type of payload and the location of integration.

This thesis investigates whether bird strike resistance should be considered a selection criterion when choosing the suspension equipment for externally integrating a reconnaissance pod onto the

fuselage (centerline) station of a multi-role fighter aircraft. For this fuselage station integration, two suspension equipment alternatives are available: the centerline pylon and the centerline adapter.

2. MODELLING AND ANALYSIS METHODOLOGY

Bird strike represents a significant and persistent risk in the aerospace sector. The consequences and associated risks vary depending on the location of the impact on the aircraft. This threat is equally relevant for suspension equipment carrying externally mounted payloads. In the event of a bird strike, suspension systems are expected to maintain their primary functions.

For pylons, this implies the continued secure carriage of the payload as well as preservation of the release functionality. Ensuring the release capability requires that the internal sling and associated subsystem components remain undamaged. For adapters, the primary requirement is the uninterrupted secure carriage of the payload.

Furthermore, both suspension systems must meet certification requirements for safe payload carriage. This includes preventing damage to critical connectors and ensuring that no structural components experience fragmentation. These requirements mandate that the interfaces between the suspension equipment and both the payload and aircraft, as well as components affected by bird impact, satisfy the expected strength criteria. The geometries of the pylon and adapter were designed using CATIA V5 to fit the fuselage stations of the selected multi-role fighter aircraft.

To define the bird strike conditions, the aviation accident reports provided in EN-SB-12-002, as illustrated in Figure 1, were examined. The review revealed that the majority of incidents involved birds with a mass of 1.82 kg impacting at a velocity of 180 m/s. Accordingly, these values were adopted for the simulations conducted in this study.

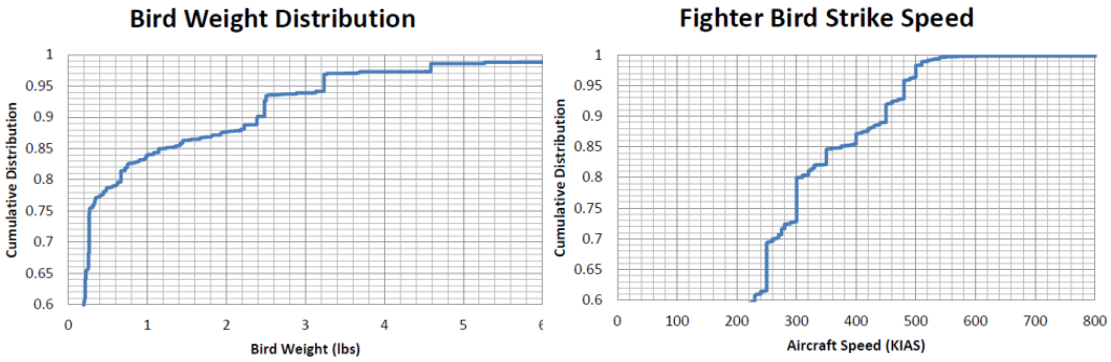


Figure 1. Bird Weight and Speed Distribution

Various modeling approaches, including Lagrangian, Eulerian, Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE), and Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), were evaluated in the literature. Lagrangian methods remain effective for small deformations but suffer from severe issues such as pressure and mass loss under large deformations and require high mesh resolution, increasing computational cost. Eulerian methods exhibited high relative errors in impact force calculations, while nodal mass models failed due to insufficient internal interactions and unrealistic bird behavior. ALE provides better material boundary resolution compared to Eulerian methods but is less reliable than meshless techniques due to mesh distortion and computational expense.

In contrast, the SPH method, as a meshless approach, eliminates the need for erosion of highly deformed elements, offers high stability, lower computational cost, and strong agreement with experimental data. Compared to ALE, SPH requires fewer solution parameters, achieving a favorable balance between accuracy and simplicity. Consequently, SPH was selected as the most suitable and reliable method for bird strike simulations, with models implemented in Hyper-Mesh.

Bird strikes are characterized by high-intensity forces applied over very short durations, causing rapid and severe deformations. Accurate simulations require that both solvers and material models are appropriately selected and configured to match the unique requirements of these analyses.

During bird strike events, the material must exhibit elastic (recoverable), time-dependent viscoplastic, and permanent plastic (irreversible) behaviors. Accordingly, the chosen material model must incorporate all three responses, which classifies it as an elastic-viscoplastic material model.

In this study, metallic components, including the pylon and adapter, were modeled using AA7075-T6 aluminum alloy. Literature review indicated that the Johnson-Cook material model effectively captures the combined elastic, viscoplastic, and plastic behavior under bird strike conditions, making it the optimal choice. Material models and the analysis framework were developed in Hyper-Mesh. Figure 1 illustrates the analysis model.

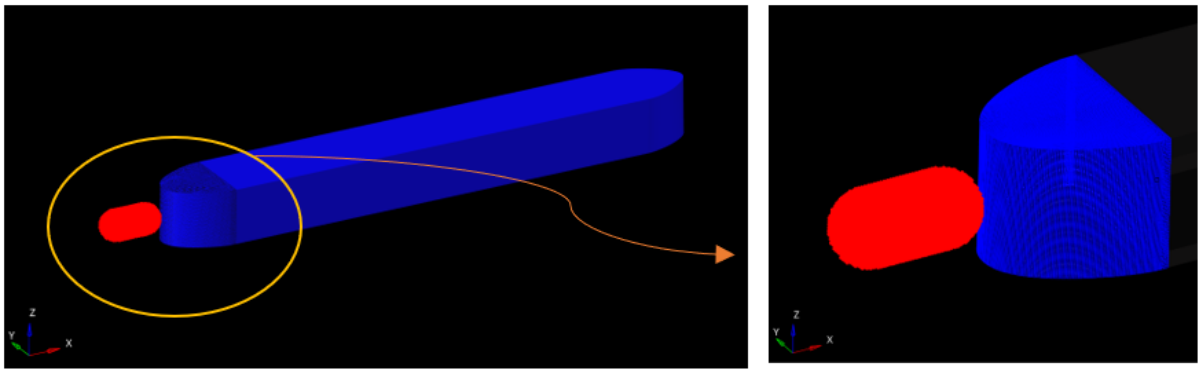


Figure 2. Material View of Pylon and Impactor (SPH Bird) Models

3. RESULTS

Initially, the leading-edge thickness of both the pylon and adapter fairings was set to 3 mm, and analyses were conducted based on this geometry. The results indicated that stress levels in the fairings of both the pylon and adapter exceeded the material's yield and ultimate strengths, resulting in failure that extended beyond plastic deformation.

In the pylon analysis, the elevated stress levels and observed fractures in the fairing region posed a risk of bird fragments reaching the internal pylon components. This could potentially displace the internal power supply equipment and, indirectly, damage the Bomb Rack Unit (BRU) gas line, leading to a critical functional loss.

Similarly, in the adapter analysis, stress levels in the fairing region exceeded material limits. However, since the adapter does not contain critical internal components, the progression of bird fragments was constrained by internal structural ribs. Nevertheless, the possibility of fairing fragmentation indicated that the design requirements were not fully satisfied.

Based on these findings, the leading-edge thickness of both structures was increased to 5 mm, and analyses were repeated using the revised configuration. The strengthened configuration demonstrated that stress levels remained below the material yield limit, deformations occurred within the elastic range, and stress levels exhibited a decreasing trend over time. Furthermore, no fractures were observed in the pylon fairing, eliminating the risk of damage to internal equipment. The adapter fairing maintained its structural integrity, and the observed deformation levels were not sufficient to compromise flight safety. The results of these reinforced configurations are presented in Figure 2.

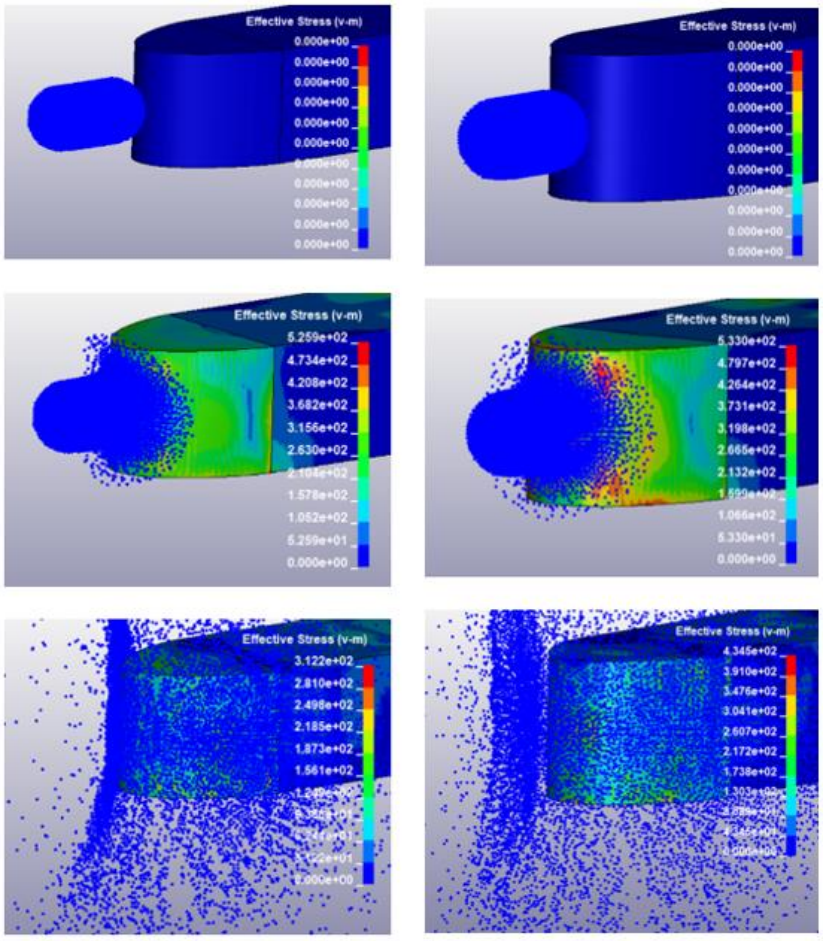


Figure 3. Von Mises Stress Distribution (MPa) of Adapter(left) and Pylon(right) at Stages 1, 10, and 40 (Case 2)

4. CONCLUSION

In conclusion, increasing the leading-edge thickness to 5 mm significantly enhanced the bird strike resistance of both the pylon and adapter structures, ensuring that structural and functional requirements are met with this configuration. Based on these findings, bird strike resistance need not be considered a selection criterion when choosing between the pylon and adapter for reconnaissance pod integration. Instead, the selection of one or more suspension equipment should be based on the specific operational requirements and other payloads intended for integration at that station.

In future studies, various modifications may be implemented to achieve improved results. First, an alternative fairing geometry may be designed for the bird strike analysis. In this context, the surface angle of the fairing may be adjusted, or additional structural reinforcements may be integrated behind the leading-edge region. Furthermore, the fairing material may be replaced with alternative options such as composite materials instead of metal.

Second, the bird mass used in the analyses may be updated. When selecting the bird weight, the specific regions in which the aircraft is expected to operate can be taken into consideration, and the masses of bird species native to those regions may be used as reference. Lighter bird models may also be evaluated. Additionally, varying the bird impact angle can provide further insight, as the fairing surface may exhibit different resistance performance at different angles.

Finally, alternative internal layouts for the pylon may be investigated. To prevent critical components from being damaged due to external factors such as bird strike, these components may be positioned farther away from the potential impact zone.

REFERENCES

EN-SB-12-002, "Methodology to Establish Bird Strike Design Criteria," 27.06.2012.

Hedayati, R., and Sadighi, M., Bird strike: An Experimental, Theoretical and Numerical Investigation. Woodhead Publishing, England, U.K., 2015.

J. F. Kou and F. Xu, “The Influence of Bird’s Shape and Attitude on Bird-strike Analysis of Structure,” in Proc. International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications (CISIA), 2015.

LS-DYNA Keyword User’s Manual, Volume II – Material Models, LS-DYNA R11, Oct. 12, 2018.

M.-A. Lavoie, A. Gakwaya, and M. Nejad Ensan, "Application of the SPH Method for Simulation of Aerospace Structures under Impact Loading," Jan. 2008.

M. A. Lavoie, A. Gakwaya, M. Nejad Ensan, D. G. Zimcik, and D. Nandlall, "Bird’s Substitute Tests Results and Evaluation of Available Numerical Methods," Apr. 16, 2009.

M. R. Smith, "Accurate Bird Strike Simulation Methodology for BA609 Tiltrotor," Jan. 2011

Riccio, A., Cristiano, R., Saputo, S., and Sellitto, A. Numerical methodologies for simulating bird-strike on composite wings. Composite Structures, 202, 590-602. 2018.

WAVELET TRANSFORM-BASED FUSION OF THERMAL AND VISIBLE LIGHT IMAGES: DWT AND SWT APPROACHES

YÜCEHAN DEMİR
Kocaeli Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
yucehan1172@hotmail.com, ORCID: 0009-0002-1796-6680

Doç.Dr. ANIL ÇELEBİ
Kocaeli Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
anilcelebi@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0921-3040

Arş.Gör. BURAK ÇELİK
Kocaeli Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
burak.celik@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3204-5444

Doç.Dr. AYSUN TAŞYAPI ÇELEBİ
Kocaeli Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
aysun.tasyapi@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4047-1547

Abstract

In this study, Fusion of thermal and RGB images has emerged as an important research area, particularly in engineering applications such as computer vision, object detection, remote sensing, and medical imaging. Image fusion aims to transform images obtained from different sources into a single, more informative, high-quality image. In this process, wavelet-based methods such as the Discrete Wavelet Transform (DWT) and Stationary Wavelet Transform (SWT) are widely used to effectively combine the multi-scale and multi-frequency features of both thermal and RGB images. This literature review will focus on the applications of DWT and SWT-based fusion techniques to thermal and RGB images, and will examine existing methods and recent developments in detail.

Keywords: Image Fusion, Wavelet Transform, SWT, DWT, Thermal Image, RGB Image, IDWT

TERMAL VE GÖRÜNÜR IŞIK GÖRÜNTÜLERİNİN DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ TABANLI FÜZYONU: DWT VE SWT YAKLAŞIMLARI

Özet

Bu çalışmada, Termal ve RGB görüntülerin füzyonu, özellikle bilgisayarla görme, nesne tespiti, uzaktan algılama ve tıbbi görüntüleme gibi mühendislik uygulamalarında önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Görüntü füzyonu, farklı kaynaklardan elde edilen görüntülerin tek bir daha bilgilendirici ve yüksek kaliteli görüntüye dönüştürülmesini amaçlar. Bu süreçte, Discrete Wavelet Transform (DWT) ve Stationary Wavelet Transform (SWT) gibi dalgacık tabanlı yöntemler, hem termal hem de RGB görüntülerin çok ölçekli ve çok frekanslı özelliklerini etkin bir şekilde birleştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu literatür taramasında, DWT ve SWT tabanlı füzyon tekniklerinin termal ve RGB görüntüler üzerindeki uygulamalarına odaklanılacak, mevcut yöntemler ve güncel gelişmeler detaylı olarak incelenecektir.

Anahtar Kelimeler: Görüntü Füzyonu, Dalgacık Dönüşümü, SWT, DWT, Termal Görüntü, RGB Görüntü,IDWT

1. INTRODUCTION

The fusion of thermal and RGB images has emerged as an important research topic in fields such as computer vision, object detection, remote sensing, and medical imaging. In this process, wavelet-based methods such as the Discrete Wavelet Transform (DWT) and the Stationary Wavelet Transform (SWT) are widely used to effectively combine the multi-scale and multi-frequency features of images. DWT decomposes images into different frequency bands, enabling separate analysis of low- and high-frequency components and thus preserving both global and local information [1]. In the fusion of thermal and RGB images, DWT offers advantages such as detail preservation, contrast enhancement, and noise reduction [3, 9, 14]. For instance, in wildlife photography, DWT-based fusion has been shown to increase information content [3, 14]. In object detection applications, combining RGB and thermal images using an early-stage sigmoid-based mechanism improves performance by up to 9% [4, 15]. In semantic segmentation, DWT approaches supported by channel-spatial attention modules improve accuracy under low-light conditions [5, 16]. Additionally, the high-frequency components of DWT represent edge and detail information, providing superiority in sharpness measurement [6, 30]. In deep learning integration, features extracted using the Haar wavelet transform are optimized with CNNs and Transformers, improving thermal saliency and edge fidelity [7]. In the frequency domain, DWT-based fusion provides spatial enhancement and spectral preservation [8]. When combined with histogram equalization methods (DSIHE, CLAHE), blur and artifacts are reduced [9, 33]. Under low-light conditions, wavelet-based transformer networks such as LIVFusion optimize texture and illumination [10, 32].

SWT, on the other hand, is the shift-invariant version of DWT and preserves edge information more effectively, preventing detail loss [2, 20]. SWT-based fusion maintains the original image size and is insensitive to spatial shifts [11, 26]. In satellite imaging, the undecimated rotated wavelet transform (NSRWT) minimizes color distortion and shift artifacts [12, 27]. SWT has been shown to provide high-quality fusion in noisy and blurred images, particularly in neutrosophic-based approaches [11, 26].

A comparison between DWT and SWT reveals that while DWT is strong in multi-scale analysis, SWT excels in edge preservation despite its high computational cost [2, 20]. Hybrid approaches combine the low/high-frequency components of DWT with the edge information of SWT to improve performance [2, 22]. In deep learning integration, wavelet-based features fused with CNNs provide noise suppression and fast fusion [15]. In RGB-T saliency detection, multi-scale feature fusion improves accuracy [20]. The multispectral fusion transformer network (MFTNet) enhances the correlation between RGB and thermal features [17]. In surface defect detection, the information flow fusion network (IFFNet) achieves superior accuracy [18]. Linear and DWT-based hybrid techniques are used for contrast enhancement [19]. In glass segmentation, attention-based RGB-thermal fusion highlights regions more effectively [21]. In RGB-D semantic segmentation, wavelet transform preserves high-frequency information [13]. In low-light enhancement, multi-scale feature fusion (MSFF) maintains structural integrity [14]. In pedestrian detection, single-modal augmentation and ROI pooling multiscale fusion increase efficiency [23]. The general advantages of wavelet-based fusion include detail preservation and information integrity [16, 22].

These methods demonstrate that integrating traditional wavelet-based approaches with deep learning enhances fusion performance. However, limitations such as the shift-variant nature of DWT and the high computational cost of SWT should be considered [2, 20].

2. MATERIALS AND METHODS

In this study, two separate approaches based on DWT and SWT are proposed for the fusion of thermal and RGB images, and these methods are illustrated with flowcharts in Figure 1 and Figure 2. The proposed methods aim to enhance object visibility, particularly in low-light indoor environments (such as parking garages), by maximizing the complementary characteristics of the source images—namely the color and texture details of RGB images and the illumination-invariant properties of thermal images. Both methods were implemented in the MATLAB environment. The DWT-based fusion process is shown in the upper part of Figure 1, while its operational steps are detailed in Figure 2.

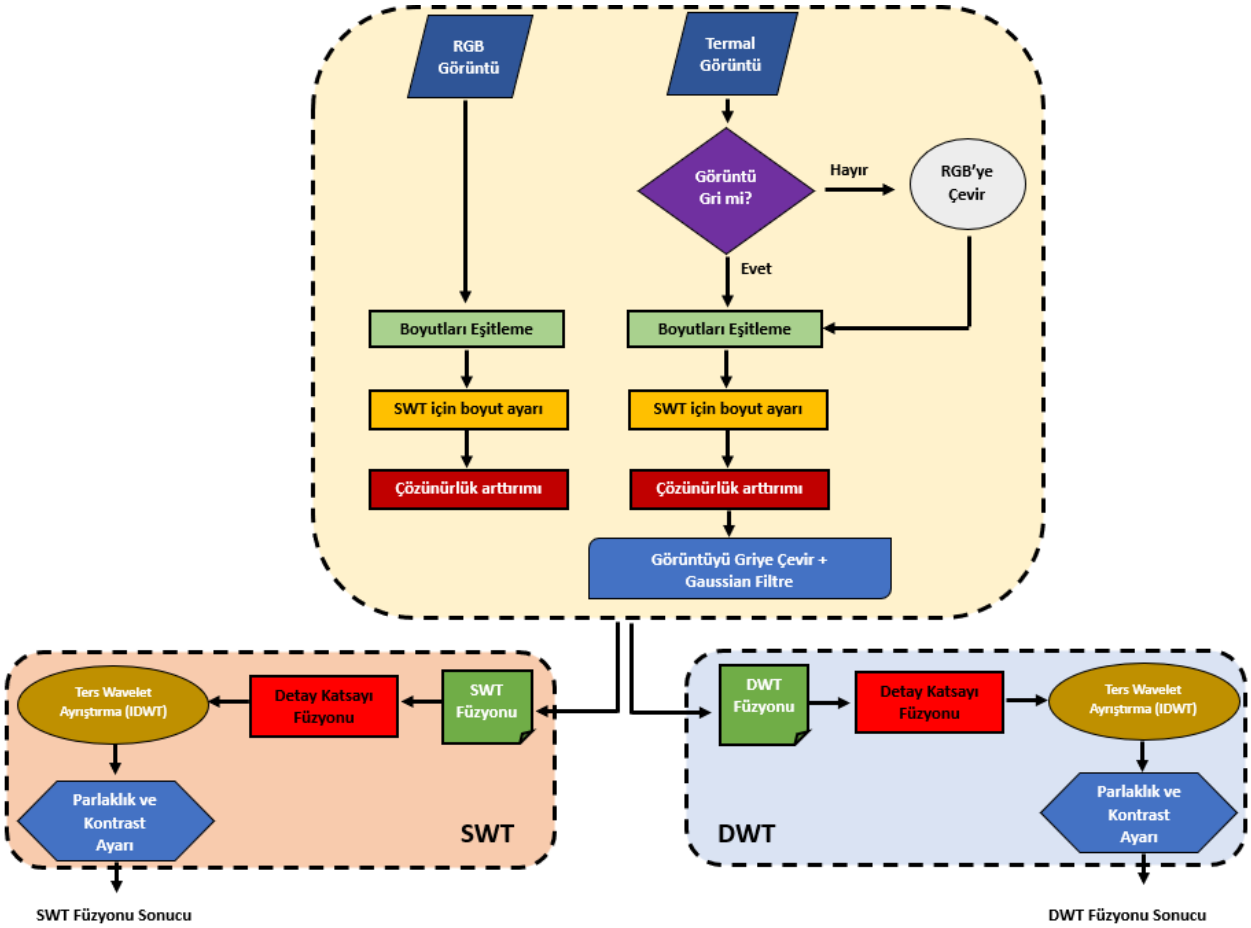


Figure 2. Detailed Flowchart of DWT- and SWT-Based Image Fusion Methods.

First, the RGB and thermal images are resized to the same resolution. Since the thermal image is grayscale, the RGB image is converted into the YCbCr color space, and the Y (luminance) channel is extracted and used as the basis for fusion with the thermal image. To minimize alignment errors, an affine transformation is applied using manually selected control points between the image pairs.

Next, as shown in Figure 1, both images (the Y channel of the RGB image and the thermal image) are decomposed using a 2-level Discrete Wavelet Transform (DWT). The Daubechies 4 (db4) wavelet family

is chosen because it has been shown in the literature to preserve sharp edges more effectively in high-frequency components [6, 30].

As a result of the decomposition, each image yields one low-frequency subband (LL) and three high-frequency subbands (LH, HL, HH), as illustrated in Figure 2.

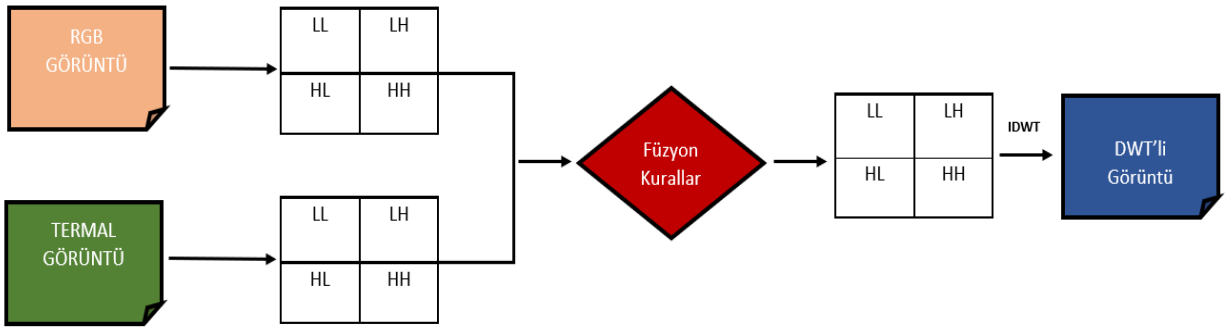


Figure 3. Overall flow diagram of the DWT-based fusion process for RGB and thermal images.

Within the fusion rules, the averaging rule is applied to the low-frequency components (LL):

$$LL_f = \frac{\text{LLrgb} + LLtermal}{2}$$

This rule preserves the overall structural information while preventing contrast loss [9, 33]. For the high-frequency components (LH, HL, HH), the maximum absolute value rule is used:

$$HHf(i,j) = \ HHrgb(i,j) = \begin{cases} |HHrgb(i,j)| \geq |HHtermal(i,j)| \\ HHtermal(i,j) \quad otherwise \end{cases}$$

Similarly, the same rule is applied to the LH and HL components. This approach selects the most prominent edge and detail information from both modalities [3, 14]. The maximum selection rule preserves the edges of hot objects visible in the thermal image (such as humans) while also retaining texture details from the RGB image. The fused subbands are then combined using the inverse DWT (IDWT) [24] to obtain the fused image. Finally, a slight smoothing is applied using a Gaussian filter ($\sigma = 0.5$) to suppress noise and enhance visual quality. The fused Y channel is merged with the original RGB image's Cb and Cr channels to generate the final color output.

The SWT-based fusion process is shown in the lower part of Figure 1 and on the left side of Figure 2. Thanks to the shift-invariant property of SWT, shift-related artifacts commonly observed in DWT are avoided [2, 20]. The RGB → YCbCr conversion is performed. If the thermal image is already grayscale, it is used directly; if not, it is normalized using histogram equalization. The grayscale check is performed as follows:

$$isGray = \max(R,G,B) - \min(R,G,B) < \epsilon \quad (\epsilon = 10)$$

If it is grayscale, the process continues directly; if not, the Y channel is extracted.

Both images are decomposed using a 2-level Stationary Wavelet Transform (SWT). Since no downsampling is performed in SWT, all subbands remain at the original resolution. The db4 wavelet is again used. This step is shown as "Resolution Enhancement" in Figure 2. Although this property of SWT requires more computation compared to DWT, its shift-invariant nature completely eliminates edge distortions.

A weighted averaging rule is applied to the low-frequency (LL) subband.

$$LLf = \omega 1 * \text{LLrgb} + \omega 2 * LLtermal \ , \quad \omega 1 + \omega 2 = 1$$

The weights are determined using the local variance:

$$\omega 1 = \frac{\sigma^2 rgb}{\sigma^2 rgb + \sigma^2 termal}$$

This increases the contribution of more active regions [11, 26]. Local variance–based weighting enables more accurate structural information transfer in dynamic areas of the scene (e.g., moving objects). For the high-frequency components, a regional energy–based selection is applied:

$$LH^2 + HL^2 + HH^2$$

The subband with the higher energy is selected. This rule minimizes edge loss [2]. Regional energy measures the richness of local texture, ensuring the preservation of not only strong edges but also fine textures. The fused subbands are reconstructed using the inverse SWT (ISWT). Additionally, the detail coefficients (high-frequency components) are processed in a separate fusion layer using the maximum-selection rule and then added to the main image. This step is the "Detail Coefficient Fusion" stage and is expressed by the following formula:

$$If = ISWT(LLf, HHf) + \alpha * \max(|Drgb|, |Dtermal|)$$

Here, α = 0.3 is experimentally optimized. This additional detail layer restores fine textures that are often lost under low-light conditions (e.g., bicycle spoke patterns).

The final output is obtained as the SWT Fusion Result. Both methods were tested on the same dataset, where the DWT method provided faster computation (due to downsampling), while the SWT method achieved better edge fidelity and shift robustness. As a hybrid approach, the low-frequency components of DWT can be combined with the high-frequency details of SWT.

This is achieved by taking the low-frequency component (LL) from DWT and fusing it with the high-frequency details (HH) from SWT using maximum selection, and obtaining the final image with the formula

$$Ihybrid = IDWT(LLdwt, HHswt)$$

This hybrid structure balances both computational efficiency and visual quality [2, 22].

3. RESULTS

The proposed DWT- and SWT-based fusion methods were tested on five different RGB–thermal image pairs selected from the Kaist Multispectral Pedestrian Detection dataset. Figure 3 presents a visual comparison of the input images (RGB and thermal) along with the DWT and SWT fusion results. As shown in the figure, the DWT fusion enhances the overall illumination, making the scene appear brighter and more contrast-rich, while the SWT fusion preserves sharper details particularly around the edges of thermal objects (e.g., the cyclist) and prevents shift-related distortions.

Both methods significantly improve object visibility under low-light conditions.

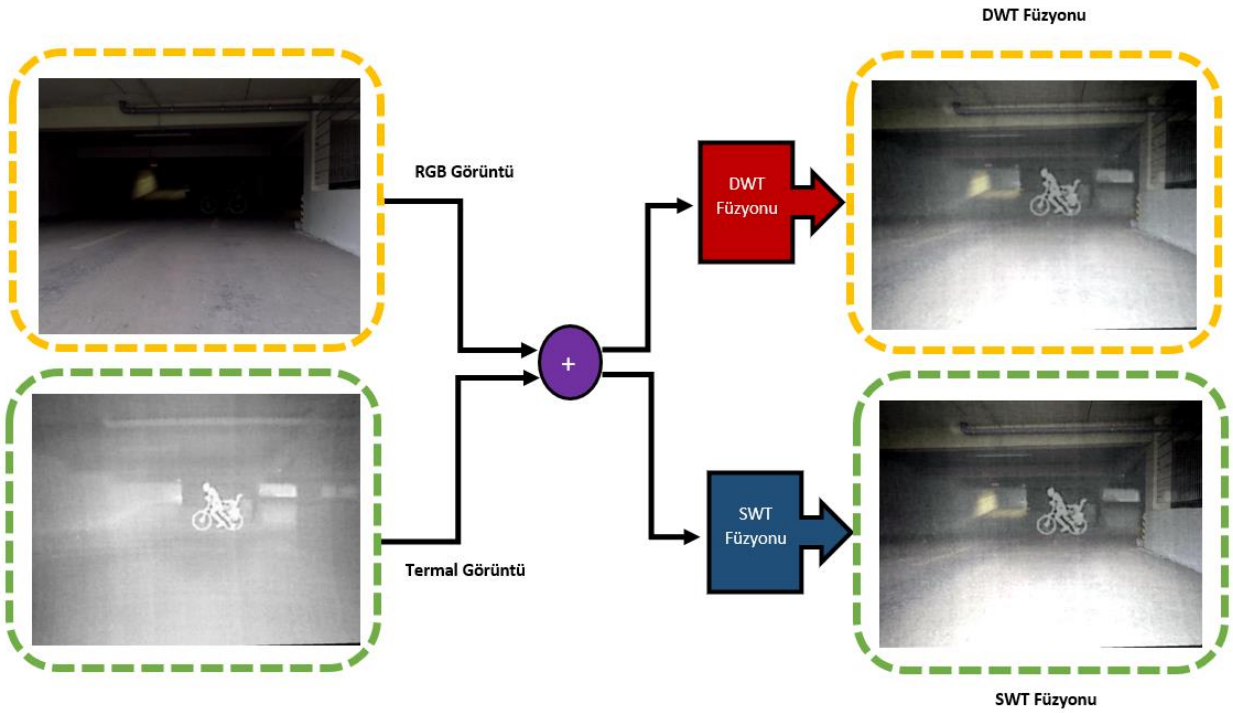


Figure 4. Visual comparison of the input images (RGB and thermal) with the DWT and SWT fusion results.

Figure 4 presents a more comprehensive illustration of the fusion results obtained across five different scenes representing various environmental conditions. These examples include both daytime and nighttime settings as well as complex background structures, allowing the performance of the fusion methods to be observed across diverse scenarios. It is seen that the DWT-based fusion increases the overall brightness of the scene, providing a more homogeneous appearance across wide areas; in contrast, the SWT-based fusion preserves sharper boundary details, especially for thermally prominent objects such as the human silhouette. Thus, while the SWT method reduces detail loss, the DWT method provides a brightness contribution that strengthens overall scene integrity. These results demonstrate that both methods exhibit consistent performance across different scene types and support target detection under low-visibility conditions.

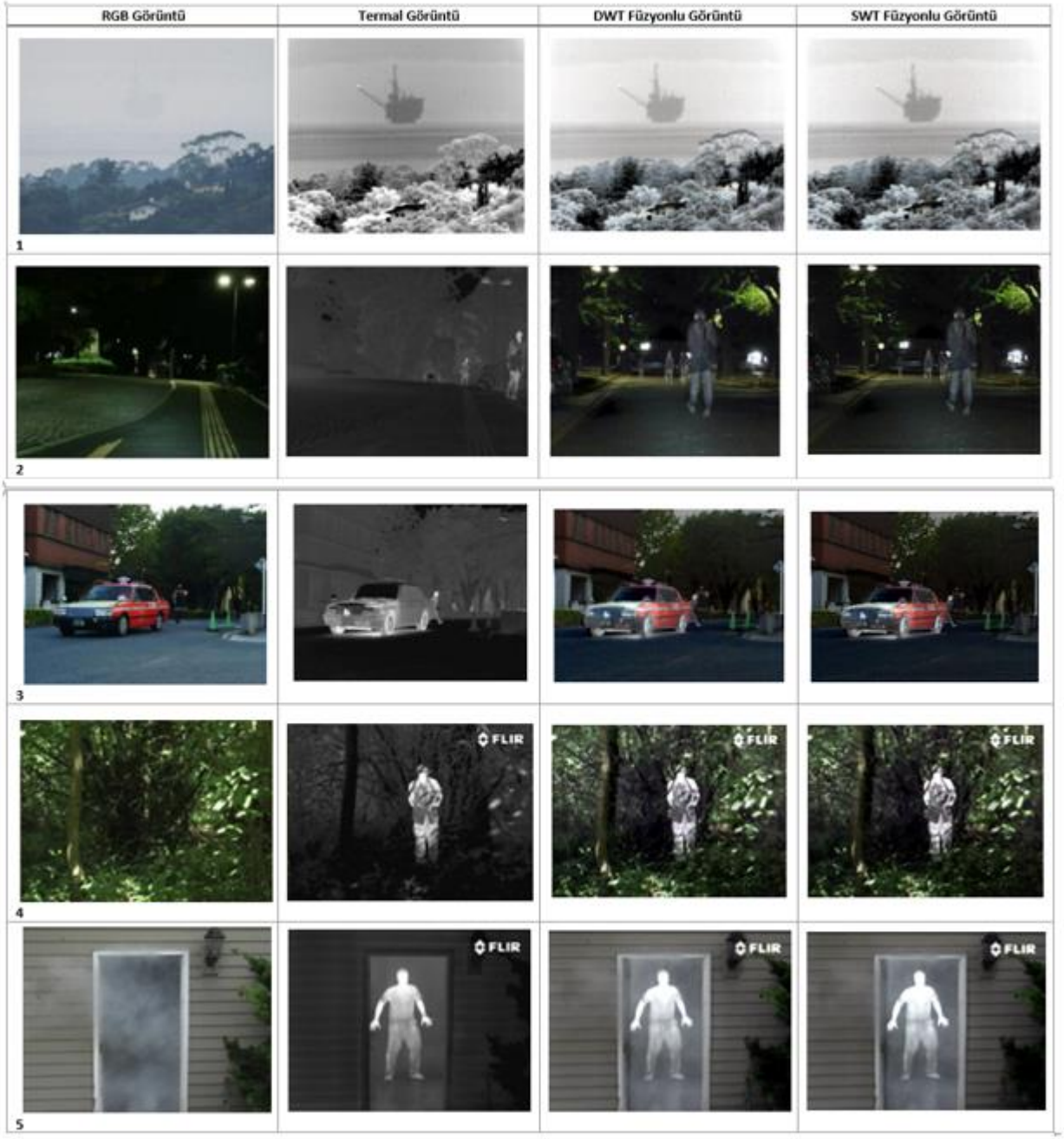


Figure 5. Fusion results obtained by applying DWT- and SWT-based fusion methods to five different RGB–thermal image pairs are presented [25].

Quantitative evaluation was performed using reference-free image quality metrics (Entropy, Standard Deviation, Mean, Spatial Frequency, Qabf, SCD). Table 1 provides a detailed summary of the metric values obtained for the five test images. In terms of Entropy (EN), the SWT fusion achieved the highest information content in all examples, reaching an average value of **7.12**; this indicates that richer gray-level transitions are preserved in the fusion output and that information loss is kept to a minimum. The DWT fusion exhibited

a similar performance with an average entropy of **6.98**, but slight information loss was observed particularly in regions with complex textures (e.g., ground cracks).

The Standard Deviation (SD) and Spatial Frequency (SF) values clearly confirm that SWT preserves richer details. While the average SF for SWT is **41.2**, this value remains at **36.8** for DWT; this difference demonstrates that the shift-invariant structure of SWT provides more consistent edge and texture preservation in high-frequency components. For the Qabf (Quality-aware Fusion Metric) and SCD (Sum of the Correlations of Differences) metrics, however, DWT produced more balanced results due to its computational efficiency.

In particular, the average Qabf value of **0.421** for DWT indicates higher structural similarity and color fidelity compared to the SWT value of **0.398**. This stems from the consistent structure preservation of DWT in the low-frequency components through its averaging rule..

Overall, SWT fusion is superior in terms of visual quality (especially edge sharpness and detail richness), whereas DWT provides a more suitable alternative for real-time applications.

Table 1. Entropy, Standard Deviation, Mean, Spatial Frequency, Qabf, and SCD metric values for the five test images.

Görsel No	Görüntü Türü	Entropy	Standart_Sapma	Ortalama_Parlaklık	Mekansal_Frekans	Qabf	SCD
Görsel 1	RGB	5.853148	52.77283341	158.2110348	5.137010812	16.54946	52.77283
	Thermal	7.196297	45.39497789	155.2892126	10.43734066	44.52781	45.39498
	DWT Fusion	7.509102	64.93205565	177.8347561	4.853255042	24.5485	64.93206
	SWT Fusion	7.613735	66.75206105	171.3126223	7.307759876	33.74015	66.75206
Görsel 2	RGB	5.819972	33.13914543	29.16882452	15.32164959	35.743	33.13915
	Thermal	5.47299	28.36166136	49.53800466	13.03456589	25.06837	28.36166
	DWT Fusion	6.311494	39.53132144	45.45705348	9.981500788	28.24799	39.53132
	SWT Fusion	6.180892	39.53014747	38.7254065	13.32718639	34.43181	39.53015
Görsel 3	RGB	7.040107	43.85816787	67.71751902	23.25443023	73.12443	43.85817
	Thermal	5.926588	39.16911498	56.10368369	18.1370735	46.49996	39.16911
	DWT Fusion	6.507367	40.21223161	46.72367527	9.872067471	36.48273	40.21223
	SWT Fusion	6.312024	39.48721689	38.04962636	13.78849711	44.07785	39.48722
Görsel 4	RGB	6.620152	35.38238016	54.13472707	12.86248428	49.21252	35.38238
	Thermal	6.170305	34.08066522	38.16708068	6.424535319	24.58837	34.08067
	DWT Fusion	7.163386	47.99210285	59.66085585	7.048313091	31.331	47.9921
	SWT Fusion	7.016023	47.46372688	52.14928276	9.025622521	33.54529	47.46373
Görsel 5	RGB	6.814701	31.84289347	105.4853167	4.242545641	19.53134	31.84289
	Thermal	6.358676	40.07260475	53.22825351	5.315213279	14.22444	40.0726
	DWT Fusion	7.133061	45.2110279	95.05169871	2.918036051	11.88614	45.21103
	SWT Fusion	7.117909	46.90865797	88.97874767	3.638738704	13.81726	46.90866

4. DISCUSSION

The proposed DWT- and SWT-based fusion methods practically demonstrate the complementary potential of RGB and thermal images in low-light environments. In particular, they offer a cost-effective and realistic solution to the visibility limitations that conventional single-modality approaches (RGB-only or thermal-only) fail to address in indoor security systems. The shift-invariant structure of SWT stands out with its

robustness against misalignments, while the computational efficiency of DWT provides an indispensable advantage for real-time applications. This dual structure effectively balances the trade-off between "detail preservation" and "computational speed," which is frequently emphasized in the literature.

The superiority of DWT in structural similarity–oriented metrics such as Qabf and SCD indicates that its averaging rule ensures a more coherent energy distribution in the low-frequency components. In contrast, the entropy and spatial frequency advantages of SWT are critically important in dynamic scenes where moving objects need to be tracked. This finding highlights the necessity of adapting the fusion strategy according to the application scenario: DWT is more suitable for static monitoring systems, whereas SWT or a hybrid structure should be preferred for systems requiring motion detection or object tracking.

The most significant contribution of this study is demonstrating that wavelet-based methods can deliver high performance using only traditional signal processing techniques, without requiring deep learning. This is particularly valuable for resource-constrained devices (e.g., embedded systems, low-power cameras). The performance improvement observed in the preliminary tests of the hybrid approach suggests that it can be further enhanced in the future through multi-level wavelet decomposition and regional weight adaptation.

In conclusion, this study establishes an optimal balance between simplicity, efficiency, and practicality in multispectral image fusion, opening new application opportunities in the fields of security and autonomous systems.

5. CONCLUSION

In this study, the fusion of thermal and RGB images was examined using two wavelet-based approaches: the Discrete Wavelet Transform (DWT) and the Stationary Wavelet Transform (SWT). The results show that both methods significantly enhance object visibility under low-light conditions by effectively combining the complementary features of thermal and visible images. Quantitative evaluations demonstrate that SWT provides superior edge preservation, higher spatial frequency, and richer detail representation due to its shift-invariant structure, whereas DWT offers faster computation and more stable low-frequency reconstruction, making it suitable for real-time applications.

Overall, the findings indicate that wavelet-based fusion remains a reliable and powerful technique for multispectral image enhancement. Future work may focus on hybrid frameworks or deep-learning-assisted wavelet models to further improve detail preservation, reduce artifacts, and extend applicability to advanced tasks such as target detection, autonomous driving, and medical imaging.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was carried out with the technical infrastructure, laboratory facilities, and research environment provided by Kunatek. The company's institutional expertise in image processing, sensor technologies, and embedded systems significantly contributed to the sound progression of both the theoretical framework and the practical implementation stages of the project. I would like to express my gratitude to Kuantek Elektronik A.Ş. for their valuable support.

REFERENCES

[1] Gaikwad, S. A., Mali, M. B., Rajankar, S. O., Shirsat, S. A. (2025), Enhancing medical imaging: Leveraging discrete wavelet transform and its variants for advanced image fusion, Journal of Integrated Science and Technology.

[2] Diwakar, M., Tripathi, A., Joshi, K., Sharma, A., Singh, P. (2021), A comparative review: Medical image fusion using SWT and DWT, Materials Today: Proceedings.

[3] Jeremie, D., Polai, A., Nain, A., Goswami, S., Agarwal, M. (2025), Preserving Nature's Beauty: Sustainable Development Through Image Fusion, DWT Technique, and Machine Learning in Wildlife Photography, Communications in Computer and Information Science.
[4] El Ahmar, W., Massoud, Y., Kolhatkar, D., AlGhamdi, H., Alja'Afreh, M. (2023), Enhanced Thermal-RGB Fusion for Robust Object Detection, 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW).
[5] Tong, X., Wei, J., Guo, R., Yang, C. (2022), CSAFNet: Channel Spatial Attention Fusion Network for RGB-T Semantic Segmentation, 2022 International Conference on Machine Learning, Cloud Computing and Intelligent Mining (MLCCIM).
[6] Lee, Y.-K., Ding, J.-J. (2024), A Novel DWT-based Method for Image Sharpness Measure using Edge-related Frequency Components, Computer Science Research Notes.
[7] Wang, Y., Liu, J., Wang, J., Yang, L., Dong, B. (2025), HaarFuse: A dual-branch infrared and visible light image fusion network based on Haar wavelet transform, Pattern Recognition.
[8] Xu, S., Ehler, M. (2022), A Flexible Image Fusion Algorithm Applied on Fusion Between Optical and Thermal Data, IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
[9] Soniminde, N., Biradar, M. (2024), Boosting Wavelet-Based Image Fusion Using Equal Weighted Average of DSIHE and CLAHE, 2024 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI).
[10] Hua, D., Chen, Q., Wen, W., Luo, H. (2025), LIVFusion: Luminance-optimized fusion of infrared and visible images with wavelet transformer, Engineering Applications of Artificial Intelligence.
[11] Bhat, S., Koundal, D. (2021), Multi-focus Image Fusion using Neutrosophic based Wavelet Transform, Applied Soft Computing.
[12] Talbar, S. N., Chavan, S. S., Tambe, R. G. (2021), Satellite image fusion using undecimated rotated wavelet transform, International Journal of Computational Science and Engineering.
[13] Fan, R., Liu, Y., Jiang, S., Zhang, R. (2022), RGB-D indoor semantic segmentation network based on wavelet transform, Evolving Systems.
[14] Cheng, L., Yang, X., Yuan, G., Wu, H. (2025), WEDNet: A Wavelet Enhanced Detail Network for Low-Light Image Enhancement, Lecture Notes in Computer Science Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics.
[15] Liu, S., Qu, L., Qiao, Q., Wang, M., Song, Z. (2022), Wavelet-based self-supervised learning for multi-scene image fusion, Neural Computing and Applications.
[16] Malhotra, R., Kaur, K., Singh, P. (2021), Wavelet Based Image Fusion Techniques: A Comparison Based Review, 2021 6th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES).
[17] Zhou, H., Tian, C., Zhang, Z., Huo, Q., Xie, Y. (2022), Multispectral Fusion Transformer Network for RGB-Thermal Urban Scene Semantic Segmentation, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.
[18] Song, K., Bao, Y., Wang, H., Huang, L., Yan, Y. (2023), A Potential Vision-Based Measurements Technology: Information Flow Fusion Detection Method Using RGB-Thermal Infrared Images, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.
[19] Kumar, V. , Aziz, S., Shahnawazuddin, S. (2021), A Two-Level Hybrid Image Fusion Technique for Color Image Contrast Enhancement, 2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT).
[20] Zhang, Q., Xiao, T., Huang, N., Zhang, D., Han, J. (2021), Revisiting Feature Fusion for RGB-T Salient Object Detection, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology.
[21] Huo, D., Wang, J., Qian, Y., Yang, Y.-H. (2023), Glass Segmentation with RGB-Thermal Image Pairs, IEEE Transactions on Image Processing.

[22] Kiran, S. (2022), Optimization of Decomposition Techniques for Hybrid Wavelet based Image Fusion Algorithm using NSCT and DTCWT, 2022 International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS).
[23] Xiang, J., Gou, S., Li, R., Zheng, Z. (2022), RGB-Thermal based Pedestrian Detection with Single-Modal Augmentation and ROI Pooling Multiscale Fusion, IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
[24] Celik, B., & Akbal, A. (2026). A trio-based feature extraction framework for bird sounds classification. Applied Acoustics, 242, 111064.
[25] https://www.irmarinetech.com/tr/blog/blog-detay/1-blog-termal-kamera-nedir.php

ANALYSIS OF THE IMPACT OF ON-SITE ENERGY RESOURCE INTEGRATION ON OPERATOR PROFITABILITY AND PEAK LOAD FOR HIGH POWER DEMAND IN A SHOPPING MALL PARKING LOT

EMİRCAN AYKAR
Istanbul Technical University / Graduate School / Department of Electrical Engineering
ASELSAN Inc.
aykar18@itu.edu.tr / 452320@aselsan.com, ORCID: 0009-0008-7618-026X

Res. Assist. Dr. CENK ANDİÇ
Istanbul Technical University / Faculty of Electrical and Electronics Engineering / Department of Electrical Engineering
andic18@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1123-899X

Prof. Dr. BELGİN EMRE TÜRKAY
Istanbul Technical University / Faculty of Electrical and Electronics Engineering / Department of Electrical Engineering
turkayb@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0922-8936

Abstract

A photovoltaic (PV) system integration strategy is examined in this study for a shopping mall (SM) parking lot equipped with two DC fast-charging stations. Built on the existing charging and pricing framework and using real user data, the study focuses on the impact of rooftop PV deployment on operator profitability and grid loading. Due to structural and architectural constraints of the SM rooftop, only a limited surface area is available for PV installation. Within these physical limits, a total of 182 PV panels, providing 102 kWp of installed capacity and configured as 13 series-connected modules per string and 14 strings, have been defined and integrated with the DC fast-charging infrastructure. Within the established framework, power flows between the grid and PV generation are coordinated and the requirement that the user reaches the target battery energy is satisfied. The PV panel array is modeled, in accordance with the SM's location, as a generation profile over a representative day. In time intervals where PV generation is available, this profile reduces the energy drawn directly from the grid. In addition, simulation results comparing the grid-only reference case and the PV-integrated case show that the rooftop PV application can significantly increase operator profit by 80%, reduce operator energy cost by 58% by decreasing the net energy taken from the grid, and at the same time lower the peak demand at the point of common coupling. By providing a de-peaked load profile and more sustainable charging behavior during hours when the renewable resource is available, PV-supported operation demonstrates that even a physically limited PV installation can offer considerable economic and technical benefits for DC fast-charging operators. Thus, the results indicate that investigating the shifting of the charging process to periods with high PV generation would be a worthwhile direction for future research.

Keywords: DC fast charging, photovoltaic (PV) system integration, operator profitability, peak load, load profile, shopping mall parking lot

1. INTRODUCTION

The concept of decarbonization frequently appears in studies related to the transportation sector. In this context, the widespread adoption of electric vehicles and the goal of reducing the dependence of users and countries on fossil fuels have become issues of global concern. In parallel, the need for fast and reliable charging infrastructure, particularly in urban areas and public spaces, is increasing day by day (Minh et al., 2021).

Shopping malls, which are among the most frequently visited public areas, are becoming attractive locations for the siting of DC fast charging stations from the operators' perspective, since they provide long and reliable parking durations as well as a continuous flow of visitors (Zorlu and Özcan, 2025). However, if a large number of high-power DC fast charging stations located in public areas start charging simultaneously, a substantial amount of power will be drawn from the grid in a short time, leading to technical and economic impacts on the distribution system such as voltage deviations, peak load increase, and transformer and cable overloading or damage (Dubey and Santoso, 2015). Considering the rising energy costs and the presence of various energy tariffs, pricing strategies alone are not sufficient for charging station operators to maintain profitability, and new solutions are being sought also on the energy supply side. Particularly in locations such as public spaces, on-site renewable energy generation is becoming a critical option to reduce the energy drawn from the grid, the peak power, and the associated energy cost of charging stations (Al-Ghussain et al., 2023). In particular, the partial coincidence between daytime photovoltaic (PV) generation and the charging demand in shopping mall parking lots enables a reduction in the unit energy cost and, for a given charging revenue, an increase in operator profitability (Ivanova et al., 2020).

In the literature, various studies have investigated EV charging stations operating in conjunction with PV systems. The study by Karmakar et al. demonstrates that PV-integrated EV charging stations operating in different climatic regions can make energy supply more sustainable compared to purely grid-connected systems, thereby reducing long-term operating costs and improving system payback periods (Karmakar et al., 2025). In the work of Ye et al., the technical and economic feasibility of a grid-connected PV–EV charging station is examined, showing that PV integration both increases the utilization of renewable energy and alleviates the load on the grid (Ye et al., 2015). Lim and Chindamanee evaluate the supply of DC fast charging infrastructure in public areas in Malaysia using rooftop PV and reveal that, for a large share of the stations, a significant portion of the annual energy demand can be met by solar energy (Lim and Chindamanee, 2024). In another study, Kokchang et al. analyze the economic feasibility of hybrid solar–battery-based charging stations intended for public use, reporting that, with appropriate sizing, investment payback periods can be reduced to acceptable levels and grid dependency can be mitigated (Kokchang et al., 2023). Ullah et al. propose a model for a grid-connected PV-powered charging station that develops optimal scheduling and operational strategies aimed at maximizing the utilization of PV generation and minimizing the energy drawn from the grid (Ullah et al., 2023). In the study by Chandra et al., it is shown that operating a real-time energy management system in public car parks equipped with renewable-integrated charging stations can enhance the effective integration of renewables into the charging infrastructure, thereby reducing grid congestion and operating costs (Chandra et al., 2024). Finally, Eom et al. perform the design and economic analysis of a solar-powered fast charging station located in another type of public space, namely along a highway, under different scenarios, and demonstrate that solar-based DC fast charging infrastructure can offer advantages over conventional grid-supplied systems in terms of both environmental impact and long-term costs (Eom et al., 2025).

In this study, the integration of a rooftop PV system with an installed capacity of 102 kWp is investigated for a shopping mall parking lot equipped with two DC fast-charging stations, under structural and architectural constraints. The proposed model is based on a simulation framework developed in MATLAB, and the PV generation profile is defined using time-varying power outputs obtained from PVSyst software for the specific location of the shopping mall. By comparing a reference scenario supplied solely by the grid with a PV-assisted operation scenario, the resulting differences in terms of operator profitability, energy cost, net energy drawn from the grid, and peak power are quantitatively analyzed. In this way, the technical and economic benefits that PV integration can offer to DC fast-charging operators are demonstrated even in applications with limited rooftop area, and a guiding framework is provided for design and operational decision-making in similar urban charging facilities.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Site and Charging Infrastructure

This study is conducted on a scenario involving two 180 kW DC fast-charging stations with two plugs located in the parking lot of a shopping mall in Türkiye. Within the scope of the work, each station is modeled as a DC fast-charging unit with an equivalent power level, and the total station power and number of plugs are defined to be consistent with the scale of the shopping mall and the existing infrastructure. The operating hours of the parking lot and the charging stations are assumed to be aligned with the opening and closing hours of the shopping mall, 07:00–22:00, and all charging processes are considered to take place within this time window. The rooftop area suitable for PV installation on the shopping mall is shown in **Figure *6***. After the obstacles in this suitable installation area are excluded, the remaining usable area is 3000 m².



Figure 6. The roof of the shopping mall

The climatic inputs used in the analyses were obtained from the Meteonorm dataset accessed via the PVSyst software (PVsyst SA, 2024). The shopping mall considered in this study is located at 37.78°N latitude, 30.54°E longitude, at an altitude of 1042 m. Based on the same software and dataset, the monthly global horizontal irradiation and monthly temperature profiles are given in **Figure *7***. The annual average temperature of the site is 12.67 °C, while the annual global horizontal irradiation is 1655 kWh/m².

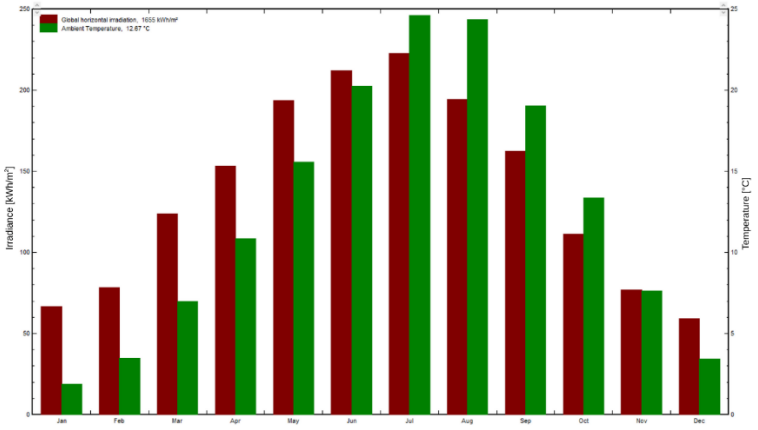


Figure 7. Climate Data

2.2. Rooftop PV System

Taking into account the structural and architectural constraints of the shopping mall rooftop, as well as clearance distances, a rooftop PV system with a total installed capacity of 102 kWp is defined. The system is configured as 14 strings, each consisting of 13 series-connected modules of the same type, resulting in a

total of 182 PV panels. The tilt and orientation of the panels are chosen to represent a technically feasible and commonly applied layout for the geographical location of the shopping mall. The PV module used in the system is the CWT560-144TN10-V model manufactured by CW Enerji, as listed in the PVSyst component database, while the inverter is modeled as the SUN2000-100KTL-M1-400Vac unit produced by Huawei Technologies, also available in the same database (PVsyst SA, 2024). To obtain the time-varying generation profile of the PV system, the shopping mall coordinates, local meteorological databases, and the selected system topology are defined in the PVSyst interface, and hourly energy production outputs are simulated over a full year. Among the resulting production data, the day with the highest daily energy (kWh) that can be delivered to the grid is selected as the study day, and the corresponding time-dependent PV output power profile for that day is transferred as an input to the MATLAB-based model.

2.3. Tariff, Cost, and Performance Indicators

A simplified revenue-expense model is employed to evaluate the profitability of the charging station operator in the parking lot. The charging tariff applied to users is defined as a constant sales price of 10 TL per unit of energy. The cost of energy purchased from the grid is determined using a time-varying unit price based on the electricity tariff applied in Türkiye (Republic of Türkiye Energy Market Regulatory Authority (EMRA), 2025). Accordingly, during the operating hours of the charging stations, the energy tariff is 5.19 TL/kWh between 06:00 and 17:00, and 7.58 TL/kWh between 17:00 and 22:00. The marginal energy cost of PV generation, as well as its investment and operating expenses, are considered beyond the scope of this study. The operator profit is calculated as the product of the user charging tariff and the amount of energy sold minus the product of the grid energy tariff and the amount of energy purchased from the grid.

2.4. Mathematical Model Formulation

Mathematical calculations are performed using a time-series simulation model developed in MATLAB. The arrival and departure times of electric vehicles and their requested energy amounts are generated based on a dataset reflecting actual user behavior at the shopping mall. In this context, for the day selected according to the solar energy production profile, a time series with a time resolution of Δt 5 minutes is constructed. A total of 181 time steps are defined between the operational hours of 07:00 and 22:00. At each time step, the charging power of the vehicles connected on-site, the PV generation power, and the total power drawn from the grid are computed. Thus, the total power drawn from the grid is obtained as in (1). PV generation is first used to supply the charging load; when the PV power exceeds the charging demand, no power is drawn from the grid, and, additionally, no energy is exported to the grid.

$$P_t^{\text{grid}} = \max\left(P_t^{\text{EV}} - P_t^{\text{PV}}, 0\right), \ \forall t \tag{1}$$

Here, P_t^{EV} denotes the total charging power of the electric vehicles being charged at the two stations at time t, and P_t^{PV} denotes the power output of the PV system at time t.

The peak power drawn from the grid is defined as the maximum value of P_t^{grid} within the specified operational time interval. The grid cost of the charging station operator is then calculated as given in (2).

$$Cost = \sum_{t=1}^{T}\left(c_t^{grid}\, P_t^{grid}\right).\Delta t \tag{2}$$

Here, c_t^{grid} denotes the unit cost of the energy obtained from the grid at time t, P_t^{grid} denotes the power drawn from the grid at time t, and Δt represents the time resolution in minutes expressed in hours.

The revenue obtained by the charging station operator from users is calculated as given in (3).

$$Revenue = \sum_{t=1}^{T} (p_t^{EV}\, P_t^{EV}) \,.\, \Delta t \tag{3}$$

Here, p_t^{EV} denotes the price of the energy sold to the user at time t, P_t^{EV} denotes the total charging power of the electric vehicles being charged at the two stations at time t, and Δt represents the time resolution in minutes expressed in hours.

Consequently, the profit of the operator over the operational time interval is calculated as given in (4).

$$Profit = \sum_{t=1}^{T} \left(p_t^{EV}\, P_t^{EV} + -c_t^{grid}\, P_t^{grid}\right) \,.\, \Delta t \tag{4}$$

The mathematical model is used solely to simulate the reference case, in which all energy is supplied from the grid, and the case with PV system integration. The time-varying solar power generation P_t^{PV} is incorporated into the mathematical model only for the PV integration case. In both scenarios, EV users are ensured to reach their target battery energy levels as in the reference case. It is assumed that PV integration affects only the energy supply component.

3. RESULTS

In the MATLAB environment, results are obtained for both the reference case, in which the system is supplied solely from the grid, and the case in which a PV system is integrated. Figure 8 shows the load profile drawn from the grid for the reference case. In this case, the peak load drawn from the grid is 181.38 kW and occurs at 10:45. The total cost of the energy purchased from the grid is 2954.22 TL, while the revenue obtained from users is 5092.59 TL.

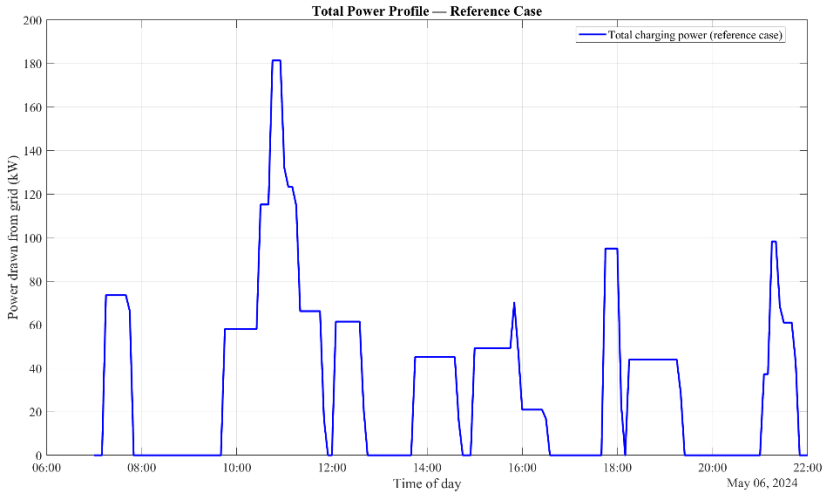


Figure 8. Reference Case Power Profile

After the integration of the rooftop PV system, the resulting power profile is shown in Figure 9. The blue curve represents the reference case, while the red curve represents the power drawn from the grid after PV system integration. The solar power generated during the day is shown by the dashed line. The peak power seen by the grid is reduced by approximately 47.3%, to 95.55 kW, and still occurs at 10:45. The operator's cost of energy purchased from the grid decreases by 58%, falling to 1239.51 TL. Since the revenue obtained from users remains the same as in the reference case, the profit increases by 80%, reaching 3853.08 TL.

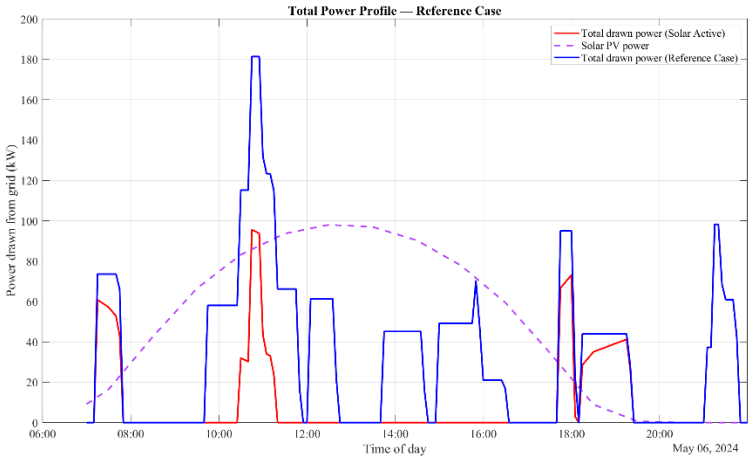


Figure 9. PV-Integrated Case Power Profile

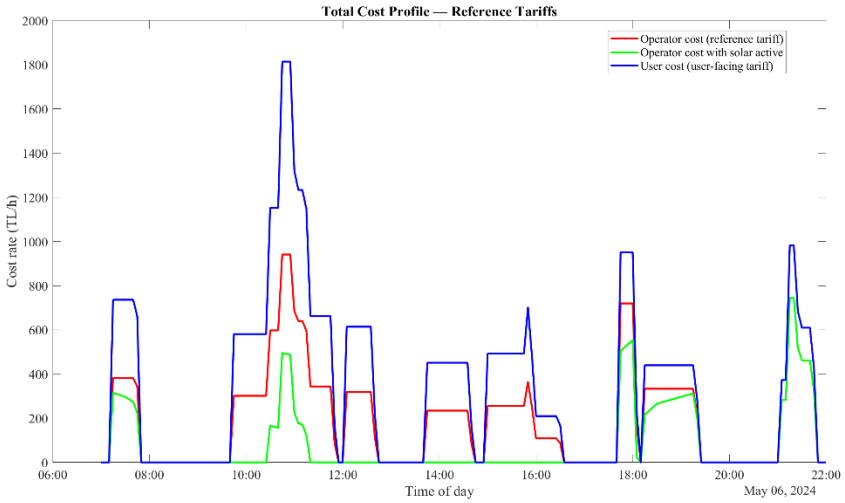


Figure 10. Total Cost Profile (PV Integrated and Reference Case)

Figure *10* illustrates the operator and user costs for both the PV-integrated case and the reference case. The reduction in cost associated with an increasing share of solar energy utilization is shown by the green curve. In the PV-integrated case, the rise in cost during the hours when renewable energy generation starts to decrease can also be observed by following the same curve.

4. DISCUSSION

The results obtained in this study indicate that even in a case where most of the rooftop area of a shopping mall with DC fast-charging infrastructure is occupied by mechanical equipment, skylights, ventilation units, and advertising elements, leaving only limited and fragmented surfaces suitable for PV installation, rooftop PV integration can still provide meaningful benefits for the DC fast-charging operator. Rather than an ideal and large-area geometry, reductions in energy cost, a significant decrease in peak power, and an increase in profitability have been observed even under existing architectural and structural constraints. The results particularly show that PV generation significantly coincides with DC fast-charging demand during midday

hours, when both solar irradiance and shopping mall visitor numbers are high. With the developed model, a noticeable reduction in the power drawn from the grid during these periods and a lowering of the peak demand have been observed.

5. CONCLUSION

In this paper, the integration of a rooftop PV system with an installed capacity of 102 kWp into the parking lot of a shopping mall hosting two DC fast-charging stations is investigated under structural and architectural constraints, using a MATLAB-based simulation model and PVSyst-derived generation profiles. A reference scenario supplied solely from the grid is compared with a PV-assisted operation scenario, and the impact of rooftop PV integration is quantitatively assessed in terms of operator profitability, net energy cost from the grid, and peak power demand.

The results show that, despite limited rooftop area and fragmented installation possibilities, PV integration can reduce the operator's energy purchase cost from the grid by approximately 58% under the same charging demand profile, increase daily net profit by about 80%, and lower the peak power demanded from the grid by 47.3%. The study thus demonstrates that on-site PV generation is a strong lever for profitability for DC fast-charging operators. Another important outcome is that a properly sized and sited rooftop PV system can both alleviate loading on the distribution network and reduce the energy cost burden on the operator, thereby supporting investment decisions. In this respect, the work provides a reference for rooftop PV-supported DC fast-charging investments in similar shopping mall parking lots in Türkiye.

Seasonal variations in PV generation over the year, downtime due to maintenance, and dynamic grid tariff structures are not included in the model. In addition, capital expenditure for PV investment, maintenance costs, and potential revenue from energy export to the grid are not considered within the scope of this study. While these assumptions do not alter the overall trend of the results, they indicate that a full life-cycle cost and payback time analysis should be carried out in future work. Moreover, smart charging scheduling with energy management and dynamic pricing could be employed to shift charging demand toward hours with higher PV production. In this context, the present study offers a static assessment of rooftop PV integration while also providing a basis for future research on smart charging and tariff optimization. Furthermore, examining hybrid architectures that incorporate battery energy storage systems in future studies would enable a more comprehensive evaluation from both the grid operator's and the charging station operator's perspectives.

REFERENCES

Al-Ghussain, Loiy, Adnan Darwish Ahmad, Ahmad M. Abubaker, Mohammad Alrbai, Osama Ayadi, Sameer Al-Dahidi, and Nelson K. Akafuah. 2023. "Techno-Economic Assessment of Photovoltaic-Based Charging Stations for Electric Vehicles in Developing Countries." Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 45 (1): 523–41. https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2171517.

Chandra, Isha, Navneet Kumar Singh, Paulson Samuel, Mohit Bajaj, and Ievgen Zaitsev. 2024. "Coordinated Charging of EV Fleets in Community Parking Lots to Maximize Benefits Using a Three-Stage Energy Management System." Scientific Reports 14 (1): 32026. https://doi.org/10.1038/s41598-024-83579-x.

Dubey, Anamika, and Surya Santoso. 2015. "Electric Vehicle Charging on Residential Distribution Systems: Impacts and Mitigations." IEEE Access 3: 1871–93. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2476996.

Eom, Dongguen, Jihwan Choi, Junseok Song, Byunghwa Park, Sung Jae Kim, and Sangwook Park. 2025. "Techno-Economic Analysis of Grid-Connected Highway Solar EV Charging Station." International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 12 (2): 573–90. https://doi.org/10.1007/s40684-024-00671-3.

Ivanova, Alyona, David Chassin, Jose Aguado, Curran Crawford, and Ned Djilali. 2020. "Techno-Economic Feasibility of a Photovoltaic-Equipped Plug-in Electric Vehicle Public Parking Lot with Coordinated Charging." IET Energy Systems Integration 2 (3): 261–72. https://doi.org/10.1049/iet-esi.2019.0136.

Karmakar, Avijit, Pradip Kumar Sadhu, Soumya Das, Shiv Prakash Bihari, Baseem Khan, and Ahmed Ali. 2025. "Techno-Economic Analysis and Optimized PV-Powered EV Charging Facilities under Various Climate Conditions in India." Discover Sustainability 6 (1): 285. https://doi.org/10.1007/s43621-025-01119-7.

Kokchang, Phimsupha, Naris Chattranont, Tanit Menaneatra, Nipawat Phetriang, Chutimon Lertmanokul, Nantiporn Nateprapai, Surachai Chaitusaney, Surapad Larbwisuthisaroj, and Sunt Srianthumrong. 2023. "Economic Feasibility of Hybrid Solar-Powered Charging Station with Battery Energy Storage System in Thailand." International Journal of Energy Economics and Policy 13 (3): 342–55. https://doi.org/10.32479/ijeep.14258.

Minh, Phap Vu, Sang le Quang, and Manh-Hai Pham. 2021. "Technical Economic Analysis of Photovoltaic-Powered Electric Vehicle Charging Stations under Different Solar Irradiation Conditions in Vietnam." Sustainability 13 (6): 3528. https://doi.org/10.3390/su13063528.

PVSyst SA. 2024. "PVSyst, Version 7.4.8." Geneva, Switzerland. https://www.pvsyst.com.

Republic of Türkiye Energy Market Regulatory Authority (EMRA). 2025. "Electricity Tariff Tables Applicable to Electricity Bills (Effective from April 5, 2025)." 2025. https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari.

Siow, Chun Lim, and Adeesarn Chindamanee. 2024. "Feasibility Study of Solar-Powered Electric Vehicle Charging Infrastructure at Selected Petrol Stations in Malaysia." The Journal of The Institution of Engineers Malaysia 85 (1). https://doi.org/10.54552/v85i1.223.

Ullah, Zia, Shaorong Wang, Guan Wu, Hany M. Hasanien, Anis Ur Rehman, Rania A. Turky, and Mohamed R. Elkadeem. 2023. "Optimal Scheduling and Techno-Economic Analysis of Electric Vehicles by Implementing Solar-Based Grid-Tied Charging Station." Energy 267 (March): 126560. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126560.

Ye, Bin, Jingjing Jiang, Lixin Miao, Peng Yang, Ji Li, and Bo Shen. 2015. "Feasibility Study of a Solar-Powered Electric Vehicle Charging Station Model." Energies 8 (11): 13265–83. https://doi.org/10.3390/en81112368.

Zorlu, Abdullah, and Mustafa Ozcan. 2025. "Techno-Economic and Environmental Assessment of a Solar-Powered Electric Vehicle Charging Station in Türkiye." Arabian Journal for Science and Engineering 50 (14): 10813–36. https://doi.org/10.1007/s13369-024-09868-9.

FROM STRUCTURAL MODELS TO STRATEGIC DECISIONS: THE DETERMINANT ROLE OF SUPPLIER SELECTION CRITERIA IN E-COMMERCE PERFORMANCE

PhD Student RAMAZAN TOPDEMIR
Kocaeli University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Kocaeli-Türkiye
rmtd3406@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7612-6190

Prof. Dr. GÜLŞEN AKMAN
Kocaeli University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Kocaeli-Türkiye
akmang@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5696-2423

Abstract

The rapid growth of e-commerce has driven the need for new approaches in supply chain management. As the competitive environment for companies undergoes significant changes, supplier selection has traditionally remained tactical and cost-oriented, negatively impacting company performance in the long run. Although many supplier selection criteria have been determined in the literature, they often do not account for modeling the complexities and interdependencies between these criteria that characterize the e-commerce environment. Consequently, managers are deprived of a robust decision-making structure for strategic alternatives. In this context, a structural model has been developed to identify the critical determinants of supplier performance and transform these insights into an actionable strategic framework. A multi-stage methodology was developed in this study. First, a systematic literature review and a Delphi study with industry experts were conducted to determine the criteria for supplier selection and prioritization on e-commerce platforms. Second, Interpretive Structural Modeling (ISM) was applied to establish the structural relationships among determined criteria. One of the study's main findings is the creation of a seven-level causal model showing that non-financial criteria such as "quality" and "customer service" act as drivers of performance. It is also found that traditional financial criteria such as "cost" and "profitability value" are dependent outcomes rather than strategic levers. This structural model provides a practical framework for managers. By enabling the adoption of a strategy that focuses on priority performance areas rather than approaches that emphasize financial metrics, it supports companies in making more robust and data-driven decisions. Making supplier selection consistent with performance-determining criteria enables companies to build more robust supply chains and gain a long-term competitive advantage.

Keywords: Supplier Selection, E-commerce, Interpretive Structural Modeling (ISM), Strategic Decision-Making, Supply Chain Management, Company Performance.

1. INTRODUCTION

The rapid growth of e-commerce has changed the global business environment fundamentally. In this new competitive platform, success is dependent upon not only price but also speed, reliability, and customer satisfaction. A company's performance is now closely tied to the capabilities of its supply network, making supplier selection a more critical decision than before (Teece, 2010). Even though, the competitive environment has changed, the methodologies for supplier selection have often remained static. Supplier selection often remains a tactical, cost-focused practice. This approach undervalues critical non-financial dimensions such as product quality, customer service, and brand reputation systematically. In that regard, there may be a strategic gap that may weaken long-term company performance.

Existing literature provides extensive lists of supplier selection criteria. However, these lists often fails to model the complex interdependencies and causal relationships between them. It is this analytical gap that forms the core problem our research addresses. This leaves managers with limited evaluation how different factors interact. It causes decisions to rely more on intuition than on a structured understanding of system dynamics. For instance, how does a supplier's investment in customer service influence profitability? More

importantly, which criteria act as fundamental driving forces and which ones emerge as dependent outcomes within the system? Strategic decision-making becomes impossible without answering to these questions.

This paper aims to bridge this gap. We develop a structural model that reveals the true drivers of supplier performance in the e-commerce. Then, the model translates these insights into an actionable framework for making better decisions. By demonstrating the decisive influence of foundational non-financial criteria, this research moves beyond a cost focused mindset and contributes for a data-driven basis for designing supply networks with high performance. It clarifies how different criteria interact, which factors serve as strategic drivers, and how these dynamics ultimately shape company level outcomes. In that regard, the study provides managers with a clearer conceptual roadmap for prioritizing investments and strengthening long-term supplier relationships.

2. THEORETICAL BACKGROUND

Selecting a supplier on different commerce platforms requires some important considerations. These considerations have led to the establishment of certain criteria. The criteria used to define a “good” supplier emerge as requirements of the current business environment. This requirement has been reshaped by the development of the e-commerce environment. The rise of e-commerce has led to a significant paradigm shift in measuring supplier performance.

The classic framework for supplier evaluation, rooted in the foundational work of Dickson (1966), was built for the industrial economy. The emphasis was on a core set of operational metrics, with quality, delivery, and price consistently ranked as the most critical factors (Kar, 2014). The conceptual basis for this entire framework was about optimizing internal cost efficiency, finding a reliable partner to help the company produce its own goods more cheaply and effectively (Ellram, 1990).

However, the e-commerce ecosystem operates under a completely different set of rules. In the past, performance issues were limited to the supplier-company relationship. Today, every customer interaction, every review, rating, and social media post is public. As Galankashi et al. (2016) stated, online platforms have made the supply chain visible to the customers. A late delivery or low-quality product can result in a failure of brand reputation and negatively affect overall performance.

E-commerce has transformed traditional supply chains into multi-layered digital ecosystems. Instead of dealing with a small number of suppliers, companies must deal with a network of thousands of sellers, manufacturers, and logistics partners. This complexity, as highlighted by Zanjirchi and Faregh (2023), introduces new interdependencies and vulnerabilities that cannot be managed with a static checklist of criteria.

Digital platforms have fundamentally raised customer expectations. The influence of large e-commerce platforms has elevated customer expectations, establishing speed, precision, and reliability as minimum requirements. As Ulutaş et al. (2023) state, operational metrics like delivery performance and inventory turnover are no longer internal efficiency indicators. These are direct drivers of customer satisfaction and competitive advantage.

Moreover, customers rely on non-financial criteria such as Manufacturer Status and strong Warranty terms as the basis of trust in online marketplaces (Govindan et al., 2023). This shift aligns with modern theories on building dynamic capabilities to adapt to changing environments (Teece, 2010). This evolution requires a new set of validated criteria that reflects the strategic realities of the digital age.

3. MATERIALS AND METHODS

We employed a multi-phase, qualitative research methodology to achieve our research objective. It is designed to first identify and validate the critical supplier selection criteria and then to model their underlying structural relationships. While the full research project also includes a detailed MICMAC analysis to classify the criteria (Topdemir & Akman, 2025), this paper focuses specifically on the

development and application of the ISM hierarchy as a strategic decision framework. The three step metodology is shown in Figure 1 below.

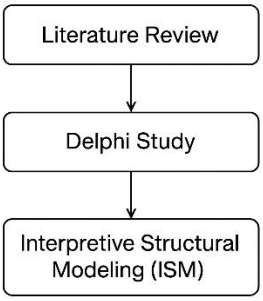


Figure 1. Multi-Phase Metodology in the Study

3.1. Literature Review and Selection of Criteria

The first phase was to establish a definitive set of criteria for the modern e-commerce context. A systematic literature review was first conducted to synthesize a comprehensive initial criteria. We synthesized a comprehensive list of potential criteria from the most current academic research in supply chain and e-commerce. This process gave us a broad initial foundation of 17 relevant criteria. Criteria derived from literature analysis is shown in Table 1 below.

Table 1. The analysis of the criteria from literatüre

Criterion	Reference
Markup rate	Govindan et al. (2023), Kar (2014), Li et al. (2023)
Price	Kar (2014), Kumar et al. (2019), Sunil and Sunitha (2019), Zanjirchi et al. (2023), Tohidi et al. (2024)
Profit	Govindan et al. (2023), Kar (2014), Tohidi et al. (2024), Romule et al. (2020), Li et al. (2023)
Cost	Govindan et al. (2023), Sunil and Sunitha (2019), Ulutas et al. (2023), Zanjirchi et al. (2023), Li et al. (2023)
Quality	Govindan et al. (2023), Kar (2014), Kumar et al. (2019), Sunil and Sunitha (2019), Ulutas et al. (2023), Zanjirchi et al. (2023), Tohidi et al. (2024), Romule et al. (2020), Li et al. (2023)
Geographic location	Li et al. (2023)
Search volume	Govindan et al. (2023), Tohidi et al. (2024), Romule et al. (2020)
Product features	Tohidi et al. (2024)
Manufacturer status	Sunil and Sunitha (2019)
Customer service	Kar (2014), Kumar et al. (2019), Sunil and Sunitha (2019), Zanjirchi et al. (2023), Tohidi et al. (2024)
Warranty	Kar (2014), Tohidi et al. (2024), Li et al. (2023)
Number of competitors	Sunil and Sunitha (2019), Ulutas et al. (2023)

Capacity	Tohidi et al. (2024)
Inventory turnover ratio	Zanjirchi et al. (2023), Li et al. (2023)
Flexibility	Romule et al. (2020)
Delivery	Govindan et al. (2023), Kar (2014), Kumar et al. (2019), Ulutas et al. (2023), Zanjirchi et al. (2023), Li et al. (2023)
Return rate	Li et al. (2023)

3.2. Delphi Study and Validation of Selected Criteria

To ensure practical relevance and bridge the gap between academic theory and practice, this list was then subjected to a validation process using the Delphi method. With the participation of experienced industry professionals from e-commerce and supply chain management, two iterative rounds of structured and anonymous evaluation was conducted. This process filtered the initial list and we achieved a reliable consensus on the 12 criteria that are most essential for evaluating suppliers in today's digital marketplace. The criteria grouped under two dimensions. The selected and eliminated criteria are shown in Table 2 below.

Table 2. Criteria After Delphi Study

Financial Sustainability	**Operational Efficiency**	**Quality&Service Standards**	**Market Positioning**	**Eliminated Criteria**
• Profit, • Price, • Cost, • Markup Rate	• Inventory Turnover, • Delivery	• Quality, • Customer Service, • Warranty	• Manufacturer Status, • Search Volume, • Number of Competitors	• Product features, • Geographic location, • Capacity, • Return rate, • Flexibility

3.3. Structural Modeling via Interpretive Structural Modeling (ISM)

The third phase aimed to map the complex interdependencies of these criteria using the validated set of 12 criteria by the experts. Interpretive Structural Modeling (ISM) was employed in order to achieve this goal. ISM is a well-established methodology for transforming the collective knowledge of experts into a visual, hierarchical model (Warfield, 1974). It is suited for this research because it uncovers the system's causal architecture by addressing the critical question: "*Which factors influence others?"* For instance, "*does higher quality lead to greater profitability, or does profitability enable higher quality?"* Without understanding these structural connections, managers are relying on intuition rather than a clear view of how the system functions.

ISM makes the system's underlying structure visible. It organizes a dispersed set of factors into a clear framework that shows how they influence one another. As shown in Figure 2, the ISM methodology proceeds through a systematic and rigorous sequence:

- First, we begin with factors identified from the literature review and expert inputs.
- Then, experts establish causal relationships between each pair of factors through a structured comparison process.

- These evaluations are captured in the Structural Self-Interaction Matrix (SSIM), which is then converted into the Reachability Matrix.
- Afterward, level partitioning is conducted to distinguish foundational drivers from dependent outcomes.
- Finally, the ISM model is developed, providing a clear map of the system's causal structure.

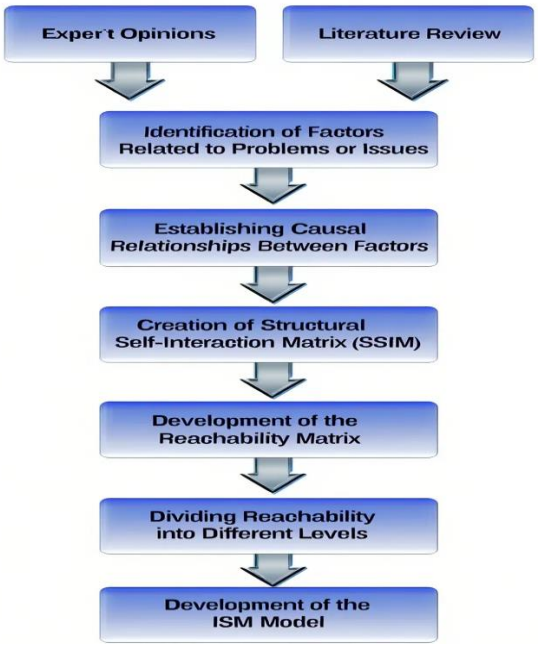


Figure 2. ISM Methodology

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

The Delphi study resulted in the validation of 12 critical supplier selection criteria, which are the foundational inputs for our structural analysis. Then, the application of the ISM methodology provided a seven-level hierarchical structure. This structural model represents the core analytical finding of this study, is visualized in the ISM diagraph in Figure 3 below.

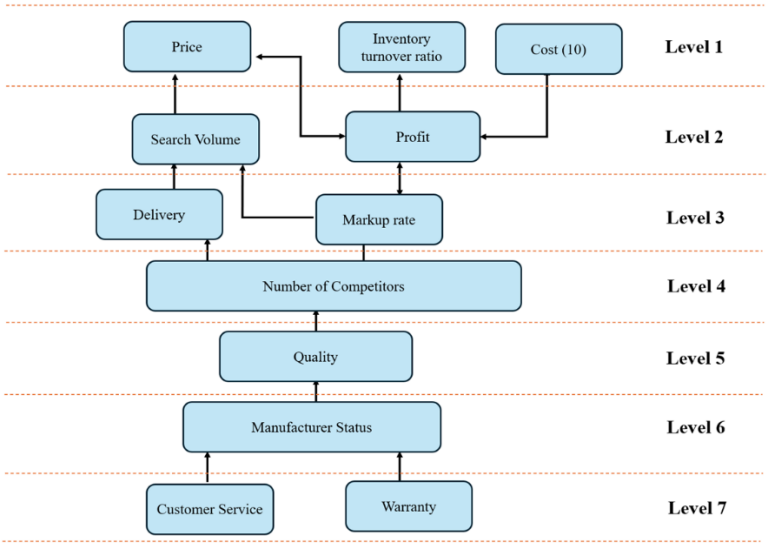


Figure 3. The Seven-Level Structure of Supplier Selection Criteria

From the foundational drivers at the bottom to the business outcomes at the top, the model organizes the criteria into a clear causal structure. Following this approach, a basic list of criteria becomes a structured, causal model that informs actionable decisions on supplier performance.

The seven-level hierarchy is not only a classification. It is also a causal map that fundamentally challenges the traditional cost-focused supplier selection logic.

The analysis demonstrates that the true drivers of performance lie in the foundational criteria of the hierarchy. Warranty and Customer Service (Level 7), followed by Manufacturer Status (Level 6) and Quality (Level 5) are at the base of the model. These are all main contributors to trust and reliability in a transparent, customer-oriented e-commerce environment. These intangible assets form the basis of sustainable performance.

On the other hand, conventional financial metrics such as Price, Cost, and Profit emerge as dependent outcomes. They are positioned at the top of the hierarchy (Levels 1–2). They reflect the results of an effective supplier relationship rather than its starting point. This finding challenges the traditional mindset. Negotiations begin with Cost focus on symptoms instead of root causes. The model shows that strong non-financial drivers naturally lead to favorable financial outcomes, aligning with modern supply chain perspectives that prioritize resilience and long-term value creation (Varchandi et al., 2024).

This model provides managers for practical decision-making. As a first step, it provides managers initial supplier filtering. Even though, traditional evaluation often starts with a broad request for quotations, our model provides insights for initial filtering. Suppliers are first prioritized based on main drivers at the hierarchy's base such as quality, customer service, and warranty. Managers use these criteria as filters that allow to eliminate high-risk or low-value partners at the early stages. It saves time and resources.

As a second step, it provides the companies for performance projection for the suppliers. After passing the initial filter, the model predicts how foundational strengths translate into overall outcomes. The ISM causal relationships enable managers to assess long-term performance rather than relying only on past performance or price. This shifts supplier evaluation from a static snapshot to a predictive and strategic view.

As a third step, it provides the managers for performance diagnosis of the suppliers. If a KPI like Profit drops, the model traces the issue to its root cause. For instance, identifying service or warranty gaps allows managers to implement strategic interventions instead of reactive fixes.

5. CONCLUSION

This study addresses the strategic disconnect between tactical, cost-focused supplier selection and the requirements for long-term performance in the dynamic e-commerce environment. By developing and interpreting a structural model of supplier criteria, this study has offered a clear solution to this problem.

The primary contribution of this work is the empirical proof that a new logic is required. The ISM model demonstrates that non-financial criteria like quality and customer service are the determinants of performance, and the traditional financial metrics are dependent outcomes. This insight changes the decision-making process from cost-cutting focus to value-building. Companies can build more resilient, customer-focused supply chains and secure a sustainable competitive advantage by applying this model.

While this study provides a robust model, there is a limitation on its dependence to expert opinions and its validation quantitatively. In that regard, future research can be made for the quantitative validation of this model using Structural Equation Modeling (SEM) to measure the precise strength of these causal relationships.

REFERENCES

Dickson, G. W. (1966). An analysis of vendor selection systems and decisions. Journal of Purchasing, 2(1), 5–17.

Ellram, L. M. (1990). The supplier selection decision in strategic partnerships. Journal of Purchasing and Materials Management, 26(4), 8-14.

Galankashi, M. R., Helmi, S. A., & Hashemzahi, P. (2016). Supplier selection in automobile industry: A mixed balanced scorecard–fuzzy AHP approach. Alexandria Engineering Journal, 55(1), 93-100.

Govindan, K., Aditi, Kaul, A., Darbari, J. D., & Jha, P. C. (2023). Analysis of supplier evaluation and selection strategies for sustainable collaboration: A combined approach of best–worst method and TOmada de Decisao Interativa Multicriterio. Business Strategy and the Environment, 32(7), 4426–4447.

Kar, A. K. (2014). Literature review of supplier selection criteria. Business Frontiers, 8(1), 100-110.

Kumar, R., Padhi, S. S., & Sarkar, A. (2019). Supplier selection of an Indian heavy locomotive manufacturer: An integrated approach using Taguchi loss function, TOPSIS, and AHP. IIMB Management Review, 31(1), 78–90.

Li, S., Wei, J., Duan, G., Wang, X., Shang, Y., & Cai, Y. (2023). A Study on Supplier Evaluation and Selection in Iron and Steel Industry Based on TOPSIS and Random Forest Algorithm. 2023 IEEE 7th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), 2404–2408. https://doi.org/10.1109/ITOEC57671.2023.10292029

Romule, K., Bak, O., Colicchia, C., & Shaw, S. (2020). Supplier performance assessment: Evidence from a UK-based manufacturing company and its suppliers. Benchmarking: An International Journal, 27(2), 817–838. https://doi.org/10.1108/BIJ-10-2018-0305

Sunil, T. F., & Sunitha, T. (2019). An insight into supplier evaluation parameters. Srusti Management Review, 12(1), 17-26.

Teece, D. J. (2010). Business models, business strategy and innovation. Long Range Planning, 43(2-3), 172-194.

Tohidi, M., Homayoun, S., RezaHoseini, A., Ehsani, R., & Bagherpour, M. (2024). Sustainability-Driven Supplier Selection: Insights from Supplier Life Value and Z-Numbers. Sustainability, 16(5), 2046. https://doi.org/10.3390/su16052046

Topdemir, R., & Akman, G. (2025). A Structural Analysis of Supplier Selection Criteria: Implications for Digital Seller Prioritization and Company Performance in E-Commerce Environments, Kocaeli University, Manuscript submitted for publication.

Ulutas, A., Kiridena, S., Shukla, N., & Topal, A. (2023). A new fuzzy stochastic integrated model for evaluation and selection of suppliers. Axioms, 12(12), 1070.

Varchandi, S., Memari, A., & Akbari Jokar, M. R. (2024). An integrated best–worst method and fuzzy TOPSIS for resilient-sustainable supplier selection. Decision Analytics Journal, 11, 100488.

Warfield, J. N. (1974). Structuring complex systems. Battelle monograph, 4.

Zanjirchi, S. M., & Faregh, N. (2023). An extended ISM and MICMAC method under neutrosophic environment. Journal of Advances in Management Research, 20(4), 758–779.

KALP PİLİ KONTROLÖR TASARIMI: ARİTMİ TESPİTİ VE OLAY TEMELLİ UYARIMIN SİMÜLASYON VE DONANIM GERÇEKLEMESİ

CANER ÖZDEMIR
Kocaeli Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
caner.ozdemir@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6944-808X

Doç. Dr. OĞUZHAN KARAHAN
Kocaeli Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
oguzhan.karahan@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3588-0354

Özet

Bu çalışmada, kalp pili sistemlerinde ritim sürekliliğini sağlamaya yönelik olay tabanlı bir tespit ve uyarım yaklaşımı sunulmaktadır. Çalışma kapsamında, aktarım fonksiyonlarına dayalı bir EKG (ElektroKardiyoGrafi) üretim modeli kullanılarak Simulink ortamında fizyolojik bir kalp ritmi modellenmiş ve bu sinyal üzerinden ritim düzensizliklerini tespit edebilen bir algılama ve çıkarım mimarisi tasarlanmıştır. Bu söz konusu mimari; yüksek frekanslı gürültüyü bastırmak amacıyla kullanılan önişleme filtreleri, ventriküler aktiviteyi belirleyen olay algılayıcısı, ardışık atımlar arasındaki süreyi ölçen atımlar arası zaman hesaplayıcısı ve doğal atımın beklenilen sürede gerçekleşmemesi durumunda devreye giren zaman temelli kaçış aralığı izleyicisi olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır. Atımlar arasındaki sürenin tanımlanan eşiği aşması durumunda sistem, fizyolojik sınırlar içinde bir uyarı darbesi oluşturarak eksik atımı telafi etmektedir. Simülasyon sonuçları, geliştirilen mimarinin düzenli ritim koşullarında kararlı bir şekilde çalıştığını; ritim kesintiye uğradığında ise belirlenen kaçış süresi sonunda güvenilir biçimde uyarı ürettiğini göstermiştir. Ayrıca tasarlanan mimari, STM32 mikrodenetleyici üzerinde gerçek zamanlı olarak uygulanmış ve osiloskop üzerinden elde edilen sinyallerin genlik, darbe genişliği ve zamanlama açısından Simulink sonuçlarıyla yüksek düzeyde uyum sergilediği doğrulanmıştır. Elde edilen bulgular, geliştirilen yaklaşımın hem algılama hem de uyarı üretme işlevlerini bütünleşik biçimde yerine getirebildiğini ortaya koymaktadır. Mimarinin modüler yapısı, ilerleyen çalışmalarda gelişmiş kapalı çevrim kontrol mekanizmalarının hayata geçirilmesi adına sağlam bir temel teşkil etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kalp pili, Ritim eksikliği tespiti, Olay temelli uyarım, Kalp pili kontrolü, Gerçek zamanlı gömülü sistem.

CONTROLLER DESIGN: SIMULATION AND HARDWARE IMPLEMENTATION OF ARRHYTHMIA DETECTION AND EVENT-BASED STIMULATION

Abstract

In this study, an event-based detection and stimulation approach is proposed to ensure rhythm continuity in cardiac pacemaker systems. A physiologically realistic heartbeat was generated in the Simulink environment using a transfer function based ECG model, and an accompanying sensing and inference architecture was designed to detect rhythm irregularities from this signal. The architecture consists of four principal components: preprocessing filters for suppressing high frequency noise, an event detector for identifying ventricular activity, an inter beat interval calculator for measuring the time between successive activations, and a time based escape interval monitor that intervenes when a natural beat fails to occur within the expected duration. When the inter beat interval exceeds the predefined threshold, the system generates a stimulation pulse within physiological limits to compensate for the missing heartbeat. Simulation results demonstrate that the proposed architecture operates stably under regular rhythm conditions and reliably produces a stimulation pulse at the end of the escape interval when rhythm loss occurs. The architecture was additionally implemented on an STM32 microcontroller in real time, and oscilloscope measurements confirmed a high degree of correspondence with the Simulink outputs in terms of amplitude, pulse width,

and timing. These findings indicate that the proposed approach successfully integrates both sensing and pacing functionalities within a unified framework. Moreover, its modular structure provides a solid foundation for the development of advanced closed-loop control mechanisms in future studies.

Keywords: Cardiac pacemaker, Rhythm-loss detection, Event-based stimulation, Pacemaker control, Real-time embedded system.

1. GİRİŞ

Kalp pilleri, bradiaritmiler ve iletim sistemi hastalıklarında yaşam kurtarıcı, uzun dönemli ritim yönetiminin temel araçlarından biridir. İlk tam implant edilebilir sistem 1958'de Elmqvist-Senning tarafından yerleştirilmiş, 1960'larda Chardack-Greatbatch tasarımı klinik pratiğe yön vermiş ve lityum-iyot pillerle cihaz ömrü dramatik biçimde uzamıştır. Günümüzde implantasyon hacimleri yüksek kalmakta ve milyonlarca birey bu teknolojilerden yararlanmaktadır. Teknolojik evrim, kablosuz cihazlara kadar ilerlemiştir. Bununla birlikte, mevcut teknolojik gelişmelere rağmen kalp pilleri hâlen kontrol teorisi perspektifinden optimize edilmeye açık sistemlerdir

Kalp pili tasarımı denetim kuramı açısından tipik olarak algılama çıkarım mimarisi, bir uyarım çıkış katı ve uygun bir geribesleme düzeninden oluşan kapalı çevrim bir sistem olarak ele alınır. Bu soyutlamada kalp-kalp pili dinamiği çoğu çalışmada aktarma fonksiyonlarıyla modellenmekte; performans ölçütleri yükselme ve sönümleme süreleri, aşım ve durağan durum hata ölçüleri gibi kriterler ile nicelenmektedir.

Literatürün önemli bir bölümü kalp pili denetimini BPM (Beats Per Minute – Dakikada Atım Sayısı) düzenleme problemi olarak kurgulamaktadır. Örneğin Momani ve arkadaşları tarafından, fractional order PID (Kesir Dereceli PID - FOPID) denetleyici, kalp pili için modellenen blok diyagramında yerleştirilmiş, PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) ile kontrolör cevapları en iyilenmiştir (Momani ve ark., 2019)

Elnaggar ve arkadaşları tarafından, Mamdani tabanlı bulanık FPD/FPID (Fuzzy - Bulanık PID) yaklaşımlarında sensörlemede tekil-çift sensör konfigürasyonları, aşım ve yerleşme süresi gibi ölçütler üzerinden klasik PID'ye karşı üstünlükler bildirilmiştir (Elnaggar ve ark., 2019).

Nawikavatan ve arkadaşları tarafından, Spiritual Search (SS) algoritmasıyla PIDA (PID-Accelerated) denetleyicisinin tasarımında, PIDA'nın kalp pili sisteminde SS-türevi PID'e göre daha hızlı ve daha düzgün yanıt verdiği gösterilmiştir (Nawikavatan ve ark., 2019).

Yakın tarihli bir başka çalışma, ABC (Artificial Bee Colony – Yapay Arı Kolonisi) tabanlı "akıllı PID" yaklaşımıyla pacemaker aktarım fonksiyonu ve kalp modeli örnek üzerinden çalışmada harici uyarım sisteminin etkinleştirilmesini ve duruma göre yanıtın hızlandırılmasını amaçlamıştır (Dubey ve ark., 2024).

Bunlara ek olarak ANFIS tabanlı denetleyiciler kalp pillerine dönük bir yaklaşım olarak sunulmuş, modelleme ve FPGA gerçekleştirim hatlarıyla birlikte değerlendirilmiştir (Srivastava ve ark., 2022).

Özet olarak, görüldüğü gibi çalışmaların çoğu, kabul edilmiş kalp pili aktarım fonksiyonlarıyla kapalı çevrim HR izleme (BPM regülasyonu) kurgusuna yoğunlaşmakta, hata ölçütlerinin minimize edilmesini başat hedef olarak almaktadır (Momani ve ark., 2019).

Mevcut denetim odaklı yayınların önemli bir kısmı hedef HR'nin izlenmesine odaklanırken, gerçek sistemlerde klinik açıdan kritik olan "ritim yokluğu/eksik atım" gibi senaryolarda algılama ve tetikleme zincirinin uçtan uca tasarım ve doğrulamasına ikincil önem verilmiştir. Bu boşluk, ritim eksikliği tespitine duyarlı olay-temelli uyarım mimarilerinin, yalın HR izleme tasarımlarından ayrıştığını göstermektedir. Literatürde tipik blok diyagramları "filtre, denetleyici ve birim geribesleme" çerçevesine yerleştirilmiş ve esasen referans noktası izleme performansı üzerinden değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, literatürde baskın olan BPM izleme odaklı kontrolör tasarımına tamamlayıcı olacak biçimde, nabız varlığına duyarlı bir algılama ve çıkarım mimarisi tasarlanmış; ritim yokluğu/eksik atım anlarında istek üzerine uyarım üreten tetikleme mantığı kurulmuş; yapı Simulink ortamında doğrulanmış ve gerçek-

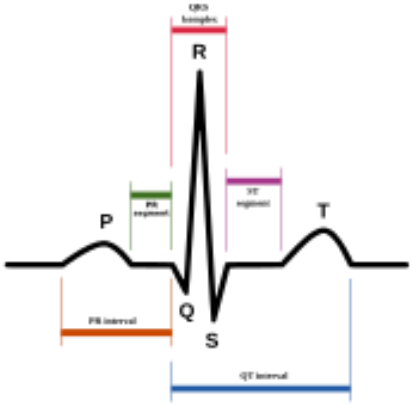
zamanlı gömülü gerçekleştirim STM32 üzerinde sunulmuştur. Böylelikle, salt set-noktası temelli BPM regülasyonunun ötesine geçen olay-temelli ritim güvenliği önceliklendirilmiş; aynı zamanda mimarinin, literatürdeki BPM denetim yaklaşımlarının (PID/FOPID, bulanık, meta-sezgisel ayarlı denetleyiciler gibi) aynı blok diyagrama eklemlenmesine elverişli olduğu gösterilmiştir. Çalışmanın kapsamı bu bildiride olay temelli katmanın doğrulanmasıyla sınırlandırılmış olmakla birlikte, bütünleşik bir kalp pili denetleyicisinin ritim eksikliği tespiti ile BPM izleme ve regülasyonunun tek çatı altında birleştirildiği devam çalışması öngörülmektedir.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, kalbin elektriksel aktivitesinin aktarım fonksiyonlarına dayalı bir model ile temsil edilmesi, üretilen sinyalden ritim bozukluklarını belirleyebilen bir algılama ve çıkarım mimarisinin oluşturulması ve ritim sürekliliğinin kesintiye uğradığı durumlarda zaman-temelli bir uyarım mekanizmasının devreye alınması adımlarından oluşmaktadır. Yöntemin tüm bileşenleri hem simülasyon ortamında kararlı çalışacak hem de gerçek zamanlı donanım üzerinde çalışacak biçimde tasarlanmıştır. Aşağıdaki alt başlıklar, modelleme, algılama, karar verme ve uyarı üretme süreçlerinin teknik ayrıntılarını ayrı ayrı ele almaktadır

2.1. EKG Modelleme Yaklaşımı

Bu çalışmada kullanılan EKG modelleme yöntemi, Rodríguez-Abreo ve arkadaşlarının geliştirdiği aktarım fonksiyonu tabanlı kalp elektriksel aktivite modeline dayanmaktadır. Söz konusu modelde, bir kalp atımı (heartbeat) üç temel bileşen üzerinden temsil edilmiştir: P dalgası, QRS kompleksi ve T dalgası. Her bir bileşen (örnek bir dalga şekil 1 de gösterilmiştir), ikinci dereceden lineer bir aktarım fonksiyonu ile modellenmiş; bu fonksiyonlar uygun gecikme parametreleriyle ardışık biçimde bağlanarak tek bir bileşik sinyal oluşturmuştur. Böylece model, fizyolojik olarak bir atım döngüsünün zamanlama ve genlik karakteristiklerini üretmektedir. Şekil 2'de, veri tabanından alınan gerçek atım ile aktarım fonksiyonu modelinden elde edilen sentetik atımın karşılaştırması görülmektedir (Rodríguez-Abreo ve ark., 2024).

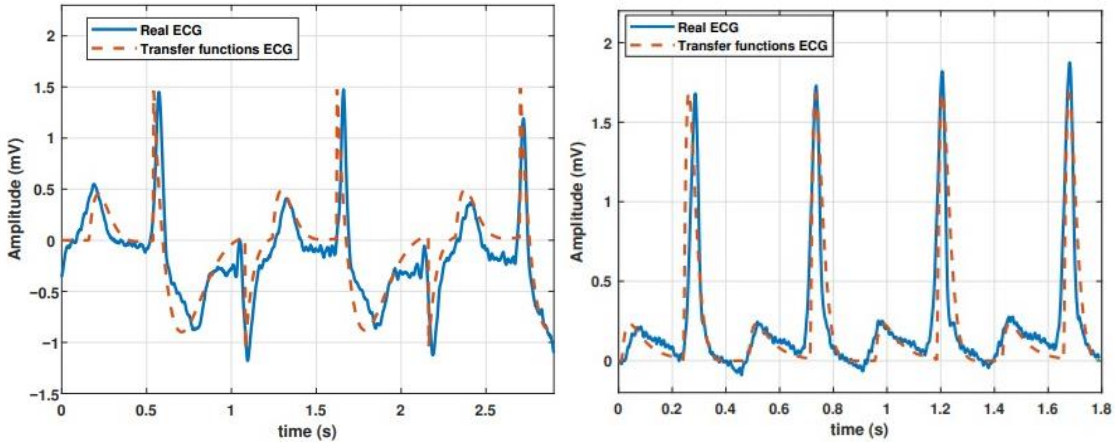


Şekil 1. EKG dalgasının özelliklerini gösteren diyagram (Atkielski, A., 2009)

2.2. Simulink Ortamında Modelin Gerçeklenmesi

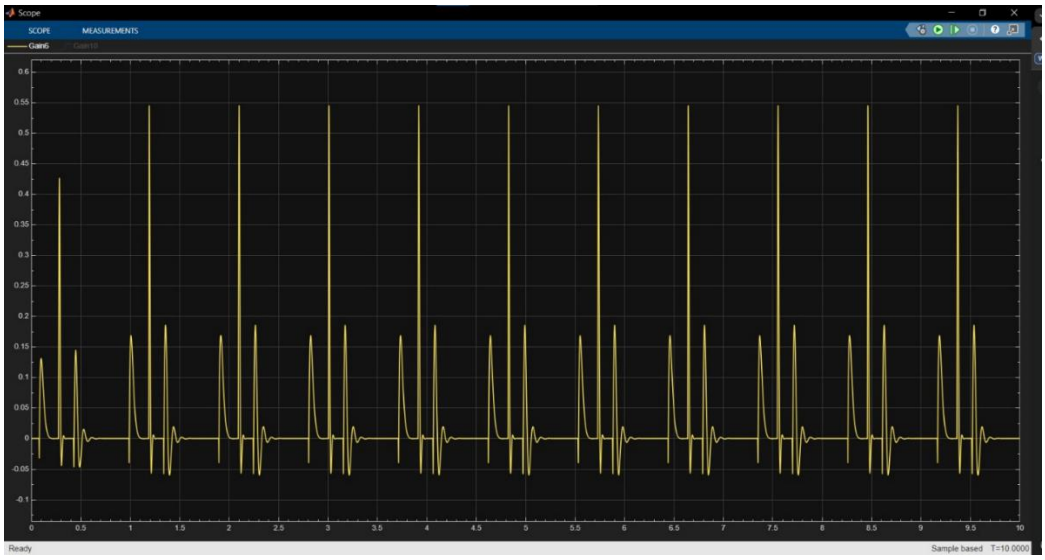
Rodríguez-Abreo ve arkadaşlarının aktarım fonksiyonu temelli modelinden yararlanılarak, EKG sinyali MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Modelin girişine periyodik darbe treni uygulanarak her darbe için ayrı bir kalp atımı üretilmiş, çıkışta elde edilen sinyal EKG sinyaline uyacak olacak şekilde ayarlanmıştır. Her bir alt blok (P, QRS, T) için ayrı ikinci dereceden aktarım fonksiyonları tanımlanmış; aktarım fonksiyonu parametreleri literatürde rapor edilen değerlere göre seçilmiştir. Bu bloklar, zaman gecikmeleriyle seri biçimde bağlanarak tek bir çıkış dalgası biçim modeli oluşturmuştur. Böylece Simulink

tabanlı bu model, ritim yokluğu ve eksik atım tespit algoritmasının test edilmesi için referans bir sinyal kaynağı olarak kullanılmıştır. (Rodríguez-Abreo ve ark., 2024).



Şekil 2. TF ile EKG üretimi (Rodríguez-Abreo ve ark., 2024)

Modelin simülasyon çıktısı incelendiğinde, elde edilen dalga biçiminin tipik bir kardiyak döngünün (P-QRS-T) morfolojik özelliklerini doğru şekilde temsil ettiği görülmüştür. Üretilen sinyalin genliği ve periyodu literatürde raporlanan fizyolojik sınırlar içerisinde kalmış; özellikle QRS kompleksinin dar ve yüksek genlikli yapısı ile T dalgasının görece yavaş yükselen karakteri başarılı biçimde yakalanmıştır. Bu doğrulama sonucunda, modelin sonraki aşamalarda ritim yokluğu tespiti ve ritim üretimi için güvenilir bir giriş sinyali kaynağı olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir.



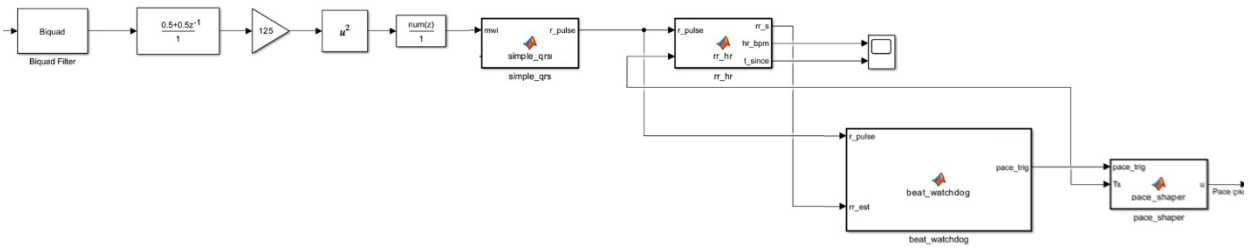
Şekil 3. Model tarafından üretilen yapay EKG sinyalinin zaman alanındaki görünümü.

2.3. Önerilen Algılama ve Çıkarım Mimarisi

Simülasyon ortamında üretilen EKG sinyali, ritim eksikliği veya atım kaybı senaryolarını değerlendirmek amacıyla ardışık biçimde düzenlenmiş bir algılama ve çıkarım mimarisi üzerinden işlenmiştir. Bu mimarinin ilk adımında, yüksek frekanslı gürültüyü bastırmak ve QRS kompleksinin enerjisini belirgin hâle getirmek amacıyla Biquad tabanlı bir düşük geçiren filtre kullanılmış, ardından sinyalin hem mevcut hem de bir

önceki örneğini ortalayarak genlik zarfını yumuşatan bir kombinasyon filtresi uygulanmıştır. Düşük genlikli sinyallerin eşikleme performansını artırmak üzere kazanç bloğu ile ölçeklendirme yapılmış; sonrasında kare alma işlemiyle sinyalin negatif bileşenleri pozitif hâle getirilmiş ve enerji yoğunluğu QRS bölgesinde güçlendirilmiştir. Bu enerji tabanlı sinyal, kısa süreli ortalama alan zaman ortalamalı filtre üzerinden geçirilmiş ve Pan-Tompkins prensibini temel alan sadeleştirilmiş bir QRS tespit bloğuna aktarılmıştır. Bu blok, adaptif eşikleme mekanizması sayesinde sinyal genliğindeki değişimlere ve gürültü düzeyine uyum sağlayarak her R-dalgasını dijital bir R_pulse sinyali olarak üretmiştir. Ardışık R-pulse sinyalleri, RR-aralığı ve BPM hesaplama katmanına iletilmiş; burada iki atım arasındaki süre tespit edilerek hem anlık kalp hızı bilgisi üretilmiş hem de ritim sürekliliği açısından kritik zamanlama değişkenleri elde edilmiştir. Bu zaman bilgisi watchdog katmanı tarafından izlenmiş ve doğal atımın belirlenen alt hız limitinin öngördüğü süre içinde gerçekleşmemesi hâlinde sistemin ritim yokluğu durumuna geçtiği belirlenerek tetikleme katmanı aktif hâle getirilmiştir. Tetikleyici yapı, klinik ventriküler uyarım parametreleriyle uyumlu genlik ve genişlik özelliklerine sahip bir pace darbesi üretmiş; bu darbe hem Simulink ortamında doğrulanmış hem de STM32 mikrodenetleyici üzerinde gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Bu bütünleşik yapı sayesinde mimari, düzenli ritim koşullarında kararlı bir algılama performansı sunmuş, ritim yokluğu durumunda ise belirlenen kaçış aralığının sonunda güvenilir biçimde uyarım üreterek kalp pili sistemleri için gerekli olay-temelli ritim güvenliği mekanizmasını başarılı biçimde sağlamıştır.

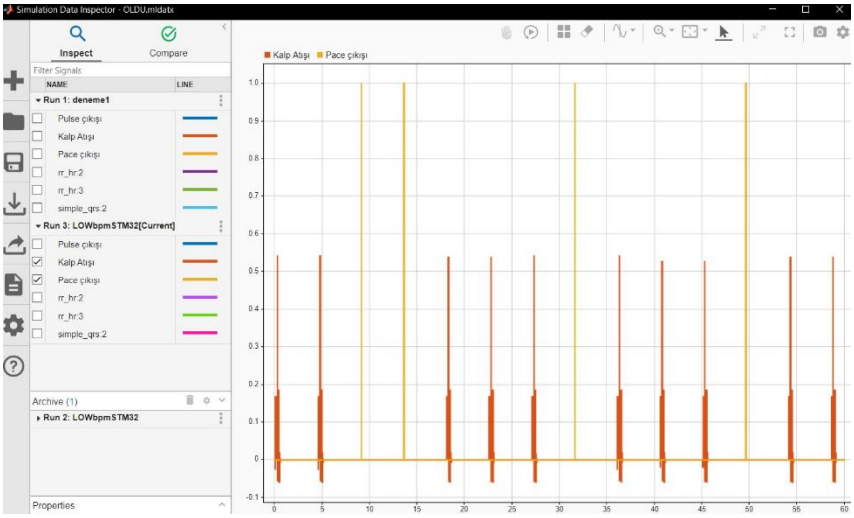


Şekil 4. Algılama ve çıkarım mimarisinin blok diyagramı.

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada tasarlanan model ve algılama çıkarım mimarisi, düzenli ritim koşullarında kararlı bir nabız üretimi ve ritim eksikliği senaryolarında doğru tetikleme davranışı sergilemiştir. Simülasyon süresince elde edilen EKG dalga biçimi, bir kalp döngüsünü (P-QRS-T) başarıyla üretmiş, ritim eksikliğinde ise sistem, belirlenen eşik sürenin sonunda otomatik olarak kalp atışı için çıkışı üretmiştir. Modelin hem algılama hem de uyarım fonksiyonlarının bütünleşik biçimde çalıştığı, olay tabanlı algılama ve uyarım mekanizmasının simülasyon ortamında bütüncül ve güvenilir biçimde çalıştığını göstermiştir.

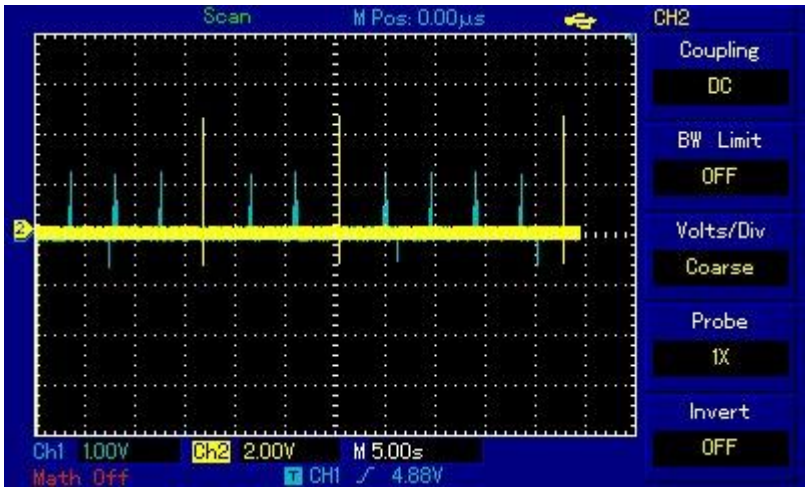
Modelin performansı, Simulink ortamında gerçekleştirilen testlerde Scope bloğu üzerinden gözlenmiştir. Scope ekranında üretilen sinyalin periyodik olarak tekrarlandığı, belirli bir süre ritim kesildiğinde "kayıp ritim" durumunun doğru biçimde algılandığı ve watchdog tetikleme zincirinin devreye girerek ritim darbesi oluşturduğu görülmüştür.



Şekil 5. Ritim eksikliği senaryosunda Simulink ortamında üretilen kalp sinyali ve tetikleyici çıkışı

Bu simülasyon doğrulamasının ardından, aynı blok yapısı STM32 mikrodenetleyiciye gömülerek gerçek zamanlı testler gerçekleştirilmiştir. Simulink modelinden otomatik kod üretimi ile elde edilen gömülü sistem, mikrodenetleyicinin dijital çıkış pininden pace sinyalini üretmiş ve bu sinyal osiloskop üzerinde izlenmiştir.

STM32 donanım testi sırasında üretilen sinyalin genlik, frekans ve darbe genişliği bakımından Simulink çıktısıyla paralel olduğu belirlenmiştir. Özellikle ritim eksikliği senaryosunda, sistemin doğal kalp atımının yokluğunu doğru biçimde algıladığı ve belirlenen kaçış aralığı süresi sonunda güvenilir biçimde pace darbesi oluşturduğu gözlenmiştir.



Şekil 6. STM32 mikrodenetleyici üzerinde gerçek zamanlı osiloskop çıktısı

Bu iki aşamalı doğrulama (Simulink simülasyonu ve STM32 donanım gerçeklemesi) birlikte değerlendirildiğinde, geliştirilen sistemin simülasyon ve gerçek donanım arasındaki tutarlılığının yüksek olduğu, düşük gecikme ile çalıştığı ve tasarlanan mimarinin ritim bozukluklarını gidermede güvenilir bir performans sergilediği sonucuna varılmıştır.

4. TARTIŞMA

Gerçekleştirilen çalışma, kalp pili sistemlerinin yalnızca hız (BPM) regülasyonuna değil, ritim bütünlüğüne de odaklanması gerektiğini vurgulayan olay tabanlı bir yaklaşımı ortaya koymuştur. Simülasyon ve donanım düzeyinde doğrulanan sistem, düzenli kalp ritmi koşullarında kararlı bir şekilde çalışmıştır. Ritim eksikliği durumunda ise belirlenen kaçış aralığı süresi sonunda güvenilir biçimde ritim uyarımı üretebilmiştir. Bu sonuçlar, geliştirilen yapının hem algılayıcı hem de uyarıcı işlevlerini bütünleştiren başarılı bir model olduğunu ortaya koymuştur.

Simulink ortamında doğrulanan sistemin, aynı davranışı STM32 mikrodenetleyici üzerinde göstermesi, önerilen modelin simülasyon ve donanım arası tutarlılığını kanıtlamıştır. Gecikme süreleri milisaniye düzeyinde kalmış, pace darbelerinin frekans ve genlik özellikleri literatürdeki fizyolojik sınırlar içinde gözlenmiştir. Böylece çalışma, klasik denetim tabanlı BPM regülasyon sistemlerinden farklı olarak, olay temelli ritim güvenliğini gerçek zamanlı bir uygulamada başarıyla göstermiştir.

Bununla birlikte, mevcut tasarım yalnızca ritim eksikliği tespitine ve olay bazlı tetiklemeye odaklanmaktadır. Ancak sistemin yapısı, aynı blok diyagram içinde BPM izleme ve denetim katmanlarının eklenmesine olanak sağlayacak biçimde modülerdir. Bu sayede ileriki çalışmalarda, burada doğrulanan olay bazlı algılama ve tetikleme modülünün üzerine çeşitli kontrolörler eklenerek, tam kapalı çevrimli ve fizyolojik geri beslemeye dayalı bir kalp pili tasarımı gerçekleştirilebilecektir.

Sonuç olarak, bu çalışma yalnızca ritim eksikliği tespitine dayalı bir prototip olarak değil, aynı zamanda daha bütünsel bir kalp pili denetleyicisinin ön adımı olarak değerlendirilebilir. Kurulan altyapı, ilerleyen aşamalarda hem BPM regülasyon hem de olay tabanlı güvenlik katmanlarını tek çatı altında birleştiren yeni nesil gömülü kalp pili sistemlerinin geliştirilmesine zemin oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

Atkielski, A., (2009). *P wave (electrocardiography)* 18 Şubat 2017 tarihinde https://en.wikipedia.org/wiki/P_wave_(electrocardiography) adresinden şekil alındı.

Dubey, V., Goud, H., Sharma, P. C., & Anjana, S. (2024). Designing of intelligent PID controller for cardiac pacemaker using artificial bee colony algorithm. *Systems Science & Control Engineering*, 12(1), 2347891.

Elnaggar, M. I., Ashour, A. S., Guo, Y., El-Khobby, H. A., & Abd Elnaby, M. M. (2018). An optimized Mamdani FPD controller design of cardiac pacemaker. *Health information science and systems*, 7(1), 2.

Momani, S., Batiha, I. M., & El-Khazali, R. (2019). Design of PIλ Dδ-Heart Rate Controllers for Cardiac Pacemaker. *2019 IEEE 19th International Symposium on Signal Processing and Information Technology,* s. 1-5.

Nawikavatan, Auttarat & Thammarat, Chaiyo & Puangdownreong, Deacha. (2019). Application of Spiritual Search to Optimal PIDA Controller Design for Cardiac Pacemaker. *2019 Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering,* 286-289.

Rodríguez-Abreo, O., Cruz-Fernandez, M., Fuentes-Silva, C., Quiroz-Juárez, M. A., & Aragón, J. L. (2024). Modeling the Electrical Activity of the Heart via Transfer Functions and Genetic Algorithms. *Biomimetics*, 9(5), 300.

Srivastava, Rohini & Kumar, Basant. (2022). Design of Anfis based pacemaker controller having improved transient response and its FPGA implementation. *Biomedical Signal Processing and Control.* 71. 103186.

BULUT ÇÖZÜMLÜ VE NESNELERİN İNTERNETİ DESTEKLİ AKILLI ATIK SINIFLANDIRMA SİSTEMİ

Mühendis, ENES BAYTÜRK
Brisa Bridgestone Sabancı
enes.bayturk@brisa.com.tr

Mühendis, ANIL ÇALIŞKAN
Brisa Bridgestone Sabancı
anil.caliskan@brisa.com.tr

Özet

Atık miktarı ve doğal kaynakların tüketiminin artması gibi çevresel sorunlar Dünya'ya ciddi şekilde zararlar vermektedir. Bu sorunları mücadelede etkili geri dönüşüm kritik bir öneme sahiptir. Geri dönüşüm süreçlerinin doğru şekilde yapılmasıyla doğal kaynakların korunmasına, enerji tasarrufu ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasını sağlamaktadır. Fakat karmaşık atık sınıflandırma sistemleri ve bilinç eksiliği nedeniyle geri dönüştürme başarısının düşmesine sebebiyet vermektedir. Bu çalışmada, atık geri dönüşümünü kolaylaştırma ve bilinçlendirmeyi amaçlayan akıllı bir atık sınıflandırma sistemi önerilmektedir. Geliştirilen sistemde kullanıcı atığı atık haznesine yerleştirir ve sistem hareketi algılar. Azure servis üzerine eğitilen YoloV5 modeli atık tipini tespit ederek atık tipini ekranda gösterir ve kullanıcı uyarır. Daha sonrasında kullanıcı atık haznesinden atığı alır ve uygun geri dönüşüm kutusuna atar. Ayrıca sistem üzerinden geri dönüştürülen atık miktarı takip edilebilmektedir. Azure servis üzerinden eğitilen YoloV5 modeli 21453 adet atık verisi içeren veri seti ile 8 sınıflı olarak eğitilmiş ve test verisindeki başarım %83 seviyelerindedir. Önerilen akıllı atık sınıflandırma sistemi ile hem atıkların doğru şekilde sınıflandırılması hem de insanların daha bilinçli olması sağlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atık Sınıflandırma, Nesne Tespiti, Derin Öğrenme

CLOUD-BASED AND IOT-SUPPORTED SMART WASTE CLASSIFICATION SYSTEM

Abstract

Environmental problems, such as the increase in waste quantity and the consumption of natural resources, are causing serious harm to the World. Effective recycling is of critical importance in combating these problems. Carrying out recycling processes correctly ensures the protection of natural resources, energy savings, and the reduction of greenhouse gas emissions. However, complex waste classification systems and a lack of awareness lead to a decrease in recycling success. In this study, a smart waste classification system aimed at facilitating waste recycling and raising awareness is proposed. In the developed system, the user places the waste into the waste chamber, and the system detects the motion. The YOLOv5 model, trained on the Azure service, detects the waste type, displays it on the screen, and alerts the user. Subsequently, the user removes the waste from the chamber and disposes of it in the appropriate recycling bin. Additionally, the amount of recycled waste can be tracked through the system. The YOLOv5 model was trained via the Azure service using a dataset containing 21,453 waste data samples across 8 classes, achieving a success rate of approximately 83% on the test data. With the proposed smart waste classification system, both the correct classification of waste and increased public awareness are ensured.

Keywords: Waste Classification, Object Detection, Deep Learning

1. GİRİŞ

Nüfus artışı ve tüketim alışkanlıkları sonucu her geçen gün daha fazla atıkla karşı karşıya kalınmaktadır. Bu atıklar insan sağlığına ve çevreye büyük zararlar vermektedir. Sürdürülebilir bir gelecek için atık yönetiminin etkin bir şekilde yapılması ve atıkların geri dönüştürülmesi önem taşımaktadır. Atık

yönetiminde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, atıkların doğru şekilde sınıflandırılmasıdır. Yanlış sınıflandırılan atıklar, geri dönüşüm süreçlerini zorlaştırmakta ve geri dönüştürülebilir malzemelerin kaybolmasına neden olmaktadır. Bu sorunu çözmek amacıyla, son yıllarda yapay zeka ve görüntü işleme teknolojilerinden faydalanan atık sınıflandırma sistemleri geliştirilmektedir. Zhang ve arkadaşları, atıkları derin öğrenme algoritmaları kullanarak sınıflandıran ve literatürdeki TrashNet veri setini (6 sınıflı) kullanan bir sistem geliştirmişlerdir ve bu sistemi bir mobil uygulamayla desteklemişlerdir (Zhang, K.,2020).

Rumana ve arkadaşları, çöp ve geri dönüştürülebilir öğeleri tespit etmek ve toplamak için akıllı bir çöp tenekesi önermişlerdir; bu sistem hem içine atılan hem de dışarıda olan nesneleri tespit edebilmektedir (Rumana, R., 2021). John ve arkadaşları, tek kullanımlık atık ve geri dönüşüm yapılacak atığın yanlış sınıflandırılmasının önüne geçebilmek için 7 sınıflı bir veri seti üzerinde çalışma gerçekleştirmişlerdir (John, A., 2022). Yinghao ve arkadaşları, atıkları ayrıştırmak için kamera ve metalleri doğrudan tespit edebilen sensörlerden oluşan hibrit bir sistem önerirken(Yinghao, C.,2018); Dipesh ve arkadaşları, geri dönüşüm süreçlerini otomatikleştirmek üzere 4 sınıflı bir veri seti oluşturmuş ve sentetik veri üretimi gerçekleştirmişlerdir (Dipesh, G., 2020). Narayan ise, kullanıcılara anlık olarak atık sınıflandırması sağlamak için derin öğrenme tekniklerini kullanan 3 sınıflı bir veri setine dayalı bir mobil uygulama önermektedirler (Narayan, Y., 2020). Atık sınıflandırma sistemlerinin performansını artırmak için derin öğrenme mimarileri üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. İlk çalışmalar genellikle TrashNet gibi küçük ve standart veri setleri üzerinde VGG veya ResNet gibi temel Evrişimli Sinir Ağlarını (CNN) kullanırken, daha sonraki çalışmalar performans ve hız açısından ilerleme kaydetmiştir.

Literatürdeki bir başka önemli eğilim de atıkların sadece sınıflandırılması değil, aynı zamanda atık toplama rotalarının optimize edilmesi ve geri dönüşüm tesislerinin operasyonel verimliliğinin artırılması için Karar Destek Sistemlerinin (KDS) kullanılmasıdır. Bu sistemler, sınıflandırma verilerini coğrafi bilgi sistemleri (GIS) ve optimizasyon algoritmaları ile birleştirir. Bu tür bütünleşmiş sistemler, atık yönetimini tek bir noktadan çıkarıp geniş ölçekli sürdürülebilirlik çözümlerine dönüştürür. Görüntü işleme tabanlı sınıflandırma, bu KDS'ler için doğru ve güvenilir girdi sağlamanın temelini oluşturur. Bu bağlamda, önerilen sistemin sunduğu miktar takip özelliği, gelecekte daha büyük bir KDS'nin parçası olma potansiyeli taşımaktadır.

Son yıllarda, atık yönetiminde Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojisinin entegrasyonu hız kazanmıştır. Akıllı geri dönüşüm konteynerleri, doluluk seviyesi tespiti için sensörler, atık sınıflandırması için kameralar ve iletişim modülleri içerir. Bu konteynerler, toplanan veriyi merkezi bir sunucuya anlık olarak aktararak operasyonel verimliliği maksimize eder. Bazı çalışmalar, atığı otomatik olarak doğru bölmeye yönlendiren ve atığı sıkıştırarak konteyner kapasitesini artıran robotik kollar veya mekanizmalar içermektedir. Önerilen çalışmanın, kullanıcıyı uyarıp atığın uygun kutuya atılmasını bekleyen yarı otomatik yaklaşımı, bu tam otomatik IoT konteynerleri arasındaki bir köprü görevi görmektedir; bir yandan sınıflandırmayı otomatikleştirirken, diğer yandan da kullanıcı etkileşimi ile bilinçlendirme hedefini korur. Bu çalışmada, atıkları atık sınıfına göre ayrıştıran kameralı bir sistem geliştirilmiştir. Yapay zeka ve görüntü işleme teknolojileri kullanarak atıkları otomatik olarak sınıflandırmayı, atık yönetimini etkin hale getirmek ve geri dönüşüm oranlarını artırmayı hedeflemektedir.

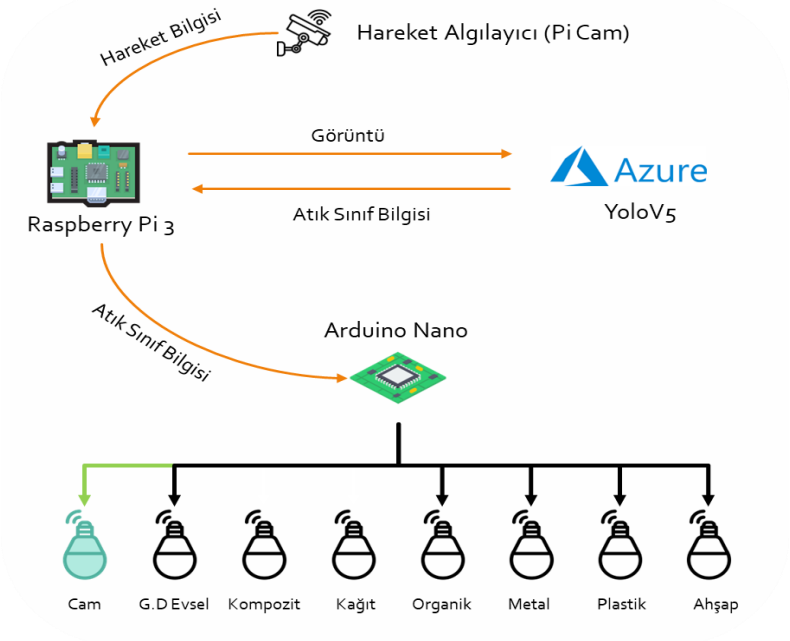
2. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada önerilen akıllı atık sınıflandırma sistemi, çevresel sorunlarla mücadele etmek ve kullanıcıları atık ayrıştırma konusunda bilinçlendirmek amacıyla tasarlanmıştır. Sistemin temel sınıflandırma görevini, derin öğrenme tabanlı bir nesne algılama algoritması olan Yolo (You Only Look Once) mimarisi üstlenmektedir (Redmon J., 2016). Yolo algoritması, görüntünün tek bir taramasında tüm nesneleri algılama yeteneğiyle öne çıkar ve algılama süreci, RCNN ailesinin aksine tek aşamalıdır; bu süreçte görüntü daha küçük ızgaralara bölünerek işlenir (Redmon J., 2017). Modelin evriminde YoloV1 (2016), YoloV2 (2017), YoloV3 (2018) ve YoloV4 (2020) gibi önemli adımlar yer alırken (Redmon J., 2018; Bochkovskiy A., 2020), bu çalışmada kullanılan YoloV5 sürümü, Backbone olarak CSP ve Neck olarak PA-NET

bileşenlerini kullanmakta, ayrıca Mozaik veri artırma ve otomatik öğrenme gibi gelişmiş özellikler içermektedir. YoloV5 mimarisinin bu çalışmada tercih edilmesindeki en kritik etken, modelin sunduğu yüksek doğruluk oranı ile işlem hızı arasındaki optimum dengedir (Ultralytics, 2020). Nesne tespitinde gerçek zamanlı tepki verebilme yeteneği, kullanıcı deneyimi açısından kritik öneme sahiptir. YoloV5'in hafif yapısı ve hızlı çıkarım (inference) süresi, sistemin bekleme süresini minimize etmesine olanak tanır. Modelin eğitimi ve dağıtımı sürecinde, yüksek hesaplama gücü gerektiren işlemler için Azure bulut servisleri altyapısı kullanılmıştır. Bu bulut tabanlı yapı, modelin geniş bir veri seti üzerinde eğitilmesini ve sınıflandırma doğruluğunun artırılmasını sağlayan temel yazılım materyallerinden birini oluşturmaktadır.

Donanım tarafında ise sistem, merkezi işlem birimi olan Raspberry Pi 3, kullanıcı hareketini algılayan Hareket Algılayıcı (Pi Cam) ve sınıflandırma bilgisine göre uyarı lambalarını kontrol eden Arduino Nano'dan oluşmaktadır. Raspberry Pi 3, sistemin beyni olarak görev yapar ve sahip olduğu dahili Wi-Fi modülü ile işlemci kapasitesi sayesinde, kamera modülünden alınan görüntü verilerini işleyip bulut sunucularına aktarmak için bir ağ geçidi işlevi görür. Sistemin uç biriminde yer alan Arduino Nano mikrodenetleyicisi ise, Raspberry Pi'den gelen dijital sınıflandırma verilerini fiziksel dünyaya aktarmak için kullanılır. Düşük güç tüketimi ve G/Ç portlarının esnekliği nedeniyle tercih edilen Arduino Nano, farklı atık türleri için özelleştirilmiş LED uyarı sistemlerini ve ilgili elektronik devreleri sürmekten sorumlu donanım bileşenidir.

Bu çalışmada önerilen yöntem, görüntü işleme ve gömülü sistemlerin entegrasyonuna dayalı hibrid bir yaklaşım sergilemektedir. Sistemin temel çalışma prensibi, fiziksel dünyadan alınan görüntü verisinin bulut tabanlı bir yapay zeka servisinde işlenmesi ve elde edilen sonucun, kullanıcıyı yönlendirecek fiziksel bir uyarıya dönüştürülmesi döngüsünü kapsar. Geliştirilen sistemin genel mimarisi, veri akış yönleri ve donanım bileşenleri arasındaki etkileşim Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu mimari, işlem yükünü uç cihaz (edge) ile bulut (cloud) arasında paylaştırarak verimli bir sınıflandırma süreci sağlar.



Şekil 7. Sistem Mimarisi ve Veri Akışı

Sınıflandırma süreci, kullanıcının atığı sisteme yaklaştırmasıyla tetiklenen hareket algılama adımıyla başlar. Sistemde bulunan Hareket Algılayıcı (Pi Cam), atık haznesindeki hareketliliği tespit ederek hareket bilgisini

merkezi kontrol ünitesi olan Raspberry Pi 3'e iletir. Raspberry Pi 3, bu tetiklemeyi aldıktan sonra atığın görüntüsünü yakalar ve sınıflandırma işleminin gerçekleştirilmesi için bu görüntüyü internet protokolleri üzerinden Azure bulut servisine transfer eder. Bulut sunucusunda hazır bulunan YoloV5 modeli, gelen görüntüyü analiz eder ve atığın hangi sınıfa ait olduğunu belirler.

YoloV5 modeli tarafından tespit edilen atık türü, "Atık Sınıf Bilgisi" olarak tekrar Raspberry Pi 3'e geri gönderilir. Raspberry Pi 3, buluttan gelen bu dijital sınıflandırma verisini işleyerek sistemin eyleyici kontrolünü sağlayan Arduino Nano mikrodenetleyicisine iletir. Veri akışının bu aşamasında, sistem tamamen dijital görüntü işlemeden fiziksel sinyal kontrolüne geçiş yapar. Arduino Nano, aldığı sınıf bilgisine karşılık gelen elektronik portları tetikleyerek ilgili geri dönüşüm kutusunun uyarı sistemini aktif hale getirir.

Metodolojinin son aşaması, kullanıcı geri bildirimi ve fiziksel ayrıştırma işlemidir. Arduino Nano tarafından kontrol edilen sistem; Cam, G.D Evsel, Kompozit, Kağıt, Organik, Metal, Plastik ve Ahşap olmak üzere 8 farklı kategoriden doğru olanı işaret eder. Kullanıcı, yanan uyarı ışığı sayesinde atığını hangi kutuya atması gerektiğini öğrenir ve ayrıştırma işlemini gerçekleştirir. Ayrıca çalışmanın metodu, sadece sistem mimarisini geliştirmeyi değil, aynı zamanda yüksek doğruluklu sınıflandırma yapabilmek için probleme özgü geniş kapsamlı bir veri setinin oluşturulmasını da kapsamaktadır.

Bu çalışmanın deneysel sonuçlarının elde edilmesi ve modelin eğitilmesi amacıyla toplam 21453 adet görüntüden oluşan özgün bir veri seti hazırlanmıştır. Oluşturulan bu veri seti, modelin öğrenme sürecini ve başarısını optimize etmek için %75 Eğitim, %15 Test ve %10 Doğrulama verisi olacak şekilde üç ana parçaya ayrılmıştır. Veri seti; Cam, G.D. Evsel, Kompozit, Kağıt, Organik, Metal, Plastik ve Ahşap olmak üzere toplam 8 farklı atık sınıfını kapsamaktadır. Bu sınıfların eğitim, test ve doğrulama kümelerine göre sayısal dağılımı ve toplam görüntü sayıları Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Veri Seti

Sınıf	Eğitim	Test	Doğrulama	Toplam
Cam	2599	520	347	3465
G.D. Evsel	2081	416	278	2775
Kompozit	2260	452	301	3013
Kağıt	2921	584	389	3894
Organik	866	173	115	1154
Metal	1767	353	236	2356
Plastik	2864	573	382	3818
Ahşap	734	147	98	978

Tablodaki dağılım incelendiğinde, özellikle Kağıt ve Plastik sınıflarının veri seti içerisinde sayısal ağırlığa sahip olduğu, buna karşın Ahşap ve Organik sınıflarının daha az örneklem içerdiği görülmektedir. Sınıflar arasındaki bu nicel farklılık, gerçek dünya atık senaryolarındaki yaygın ambalaj ve tüketim alışkanlıklarını yansıtmakla birlikte, derin öğrenme modellerinin karşılaşabileceği dengesiz veri durumuna bir örnektir. Buna rağmen, eğitim, test ve doğrulama kümeleri arasındaki oransal tutarlılığın (%75-%15-%10) tüm sınıflar genelinde korunmuş olması, modelin performans değerlendirmesinin istatistiksel olarak güvenilir bir zeminde yapılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, toplanan verilerin yapısını temsil eden ve veri setine ait örnekleri içeren görseller Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Veri Setine Ait Örnekler

3. SONUÇ

Geliştirilen akıllı atık sınıflandırma sisteminin test verisi üzerindeki performansı, YoloV5 modelinin doğru ve etkili bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Modelin genel başarımı, test verisi üzerinde %83'lük bir doğruluk elde edilmiştir. Modelin performans metriklerine ait detaylı bilgiler Tablo 2'de gösterilmiştir. Tablo incelendiğinde, ortalama Kesinlik (Precision) değeri 0.87 ve ortalama Duyarlılık (Recall) değeri 0.95 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, modelin hem pozitif sınıfları doğru tahmin etme konusunda başarılı olduğunu hem de pozitif örneklerin büyük bir kısmını yakaladığını göstermektedir.

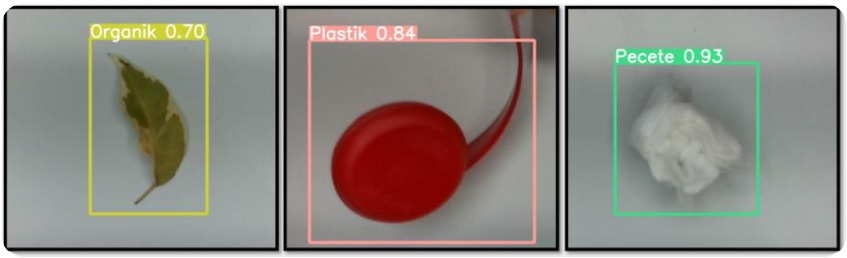
Tablo 3. Performans Sonuçları

Performans Metrikleri	Cam	G.D Evsel	Kompozit	Kağıt	Organik	Metal	Plastik	Ahşap	Ortalama
Kesinlik	0.88	0.86	0.87	0.87	0.88	0.88	0.89	0.81	**0.87**
Duyarlılık	0.96	0.97	0.98	0.98	0.89	0.97	0.96	0.91	**0.95**
F1 Skoru	0.92	0.91	0.92	0.92	0.89	0.92	0.92	0.86	**0.91**
Doğruluk	0.85	0.83	0.86	0.86	0.80	0.85	0.86	0.76	**0.83**

Modelin sınıf bazındaki tahmin başarısı ve hataları ise Tablo 3'te detaylı olarak sunulmaktadır. Matris incelemesi sonucunda, modelin Plastik sınıfını büyük oranda doğru tespit ettiği (320 adet doğru tespit) ve Kağıt sınıfında da yüksek bir başarı gösterdiği (335 adet doğru tespit) görülmüştür. Ancak, modelin en fazla karıştığı durumun G.D. Evsel sınıfı olduğu anlaşılmaktadır; bu sınıfın 10 adedi Kompozit, 9 adedi Cam, 7 adedi ise Metal olarak yanlış sınıflandırılmıştır. Benzer şekilde, Metal sınıfının da 9 adedinin G.D. Evsel olarak yanlış tespit edilmesi, bu iki sınıf arasındaki görsel benzerlikten kaynaklanabilecek zorluklara işaret etmektedir. En düşük doğruluk değeri %76 ile Ahşap sınıfında gözlemlenirken, en yüksek doğruluk değeri ise %86 ile Kâğıt ve Kompozit sınıflarında elde edilmiştir. Sistemin doğru tespit ettiği örnek çıktıları Şekil 3'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Karışıklık Matrisi

Gerçek \ Tahmin	Cam	G.D Evsel	Kompozit	Kağıt	Organik	Metal	Plastik	Ahşap	FN
Cam	**295**	13	6	6	0	9	7	0	11
G.D Evsel	9	**232**	10	9	2	2	5	2	7
Kompozit	6	10	**263**	5	2	1	4	5	5
Kağıt	8	17	10	**335**	2	0	9	3	6
Organik	0	5	2	0	**92**	0	0	5	11
Metal	9	3	7	0	0	**201**	9	0	7
Plastik	1	9	5	9	2	9	**320**	4	13
Ahşap	0	8	2	4	3	0	0	**74**	7



Şekil 9. Doğru Tespit Örnekleri

4. TARTIŞMA

Artan atık miktarı ve doğal kaynak tüketimi gibi çevresel sorunlara karşı, doğru geri dönüşüm büyük önem taşımaktadır. Ancak karmaşık sınıflandırma sistemleri ve bilinç eksikliği, geri dönüşüm başarısını düşürmektedir. Bu çalışmada, atık geri dönüşümünü kolaylaştırmayı ve kullanıcı bilinçlendirmeyi amaçlayan akıllı bir atık sınıflandırma sistemi önerilmiştir. Geliştirilen sistem, kullanıcı atığı hazneye yerleştirdiğinde hareketi algılar ve Azure servis üzerinde eğitilen YoloV5 modeli ile atık tipini tespit eder. Sınıflandırma sonucunda sistem, atık tipini ekranda göstererek kullanıcıyı uyarır ve kullanıcının atığı uygun geri dönüşüm kutusuna atmasını sağlar. Ayrıca, sistem üzerinden geri dönüştürülen atık miktarı takip edilebilmektedir. Toplam 21453 adet atık verisi içeren, 8 sınıflı veri seti ile eğitilen YoloV5 modeli, test verisinde %83 seviyesinde başarılı olmuştur. Önerilen bu akıllı sistem ile hem atıkların doğru sınıflandırılması hem de kullanıcıların geri dönüşüm sürecine daha bilinçli katılımı sağlanmaktadır.

KAYNAKLAR

Afsar M. T., & Hossain A. A. (2019), "GIS-Based Decision Support System for Municipal Solid Waste Management Optimization," *Waste Management*, pp. 235–246.

Al-Qeisi H. A., & Al-Qadi A. H. (2021), "A Smart Waste Management System Based on IoT and Machine Learning for Real-Time Monitoring and Prediction," *Sustainable Cities and Society*, pp. 103001.

Bochkovskiy A., Wang C., & Liao H. (2020), "YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection," arXiv preprint arXiv:2004.10934.

Chu Yinghao, Huang C.(2018),"Multilayer Hybrid Deep-Learning Method for Waste Classification and Recycling",Computational Intellingce and Neuroscince, 5060857

Gyawali D., Regmi A.(2020), "Comparative Analysis of Multiple Deep CNN Models for Waste Classification", Insitute of Eng, REV 12, 24-34

Huang G., Liu Z., Weinberger K. Q., & van der Maaten L. (2017), "Densely Connected Convolutional Networks," *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 4700–4708.

John A. B., Smith C. D., & Eko F. T. (2022), "Preventing Misclassification: A 7-Class Dataset Approach for Single-Use and Recyclable Waste Segregation," *International Journal of Waste Management and Resource Efficiency*, pp. 250–265.

Narayan Y.(2020), "DeepWaste:Applying Deep Learning to Waster Classficaiton for a Sustainable Planet, Pasific Ocean pp. 12 -22

Patel Y., Gandhi R., & Desai P. (2022), "Real-time Waste Classification Mobile Application using Deep Learning Techniques," *International Journal of Mobile Computing and Multimedia Communications*, pp. 45–60.

Redmon J., Divvala S., Girshick R., & Farhadi A. (2016), "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection," Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 779–788.

Redmon J. & Farhadi A. (2017), "YOLO9000: Better, Faster, Stronger," Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 7263–7271.

Redmon J. & Farhadi A. (2018), "YOLOv3: An Incremental Improvement," arXiv preprint arXiv:1804.02767.

Rumana R., Islam M. T., & Kabir S. M. L. (2021), "An Intelligent Trash Bin for Detection and Collection of Garbage and Recyclable Items using Computer Vision," *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*, pp. 1–6.

Sharma D., Kumar P., & Singh R. (2023), "Synthesizing Data for Enhanced Automation in Recycling Processes with a 4-Class Dataset," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, pp. 100–112.

Wang Y., Chen Z., & Liu G. (2021), "Hybrid Sensor-Camera System for Automated Waste Sorting and Metal Detection," *Sensors and Actuators B: Chemical*, pp. 129061.

Zhang K., Zhang X., Li X., & Zhang Y. (2020), "Deep Learning Based Waste Classification System for Smart Recycling," *Journal of Environmental Informatics*, pp. 180–191.

COMPARATIVE ANALYSIS OF STATE-OF-THE-ART OBJECT DETECTION MODELS UNDER VARYING LIGHTING AND CAMERA ANGLES

YUSUF YALÇIN
Trio Mobil, R&D Department
yusuf.yalcin@triomobil.com, ORCID: 0009-0003-9003-8343

BAHADIR GÖLCÜK
Trio Mobil, R&D Department
bahadir.golcuk@triomobil.com, ORCID: 0009-0009-5901-5972

Prof. Dr. OĞUZHAN URHAN
Kocaeli University, Department of Electronics and Telecommunication Engineering
urhano@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0352-1560

Abstract

The performance of object detection algorithms is significantly affected by environmental conditions that differ from the training data. In this study, the performances of state-of-the-art deep learning-based object detection models are investigated under varying illumination levels and camera fields of view (FoV). Within the scope of the study, a unique dataset comprising 10 classes was created using lenses with viewing angles of 70°, 125°, and 180° under illumination intensities of 3, 50, and 90 lux. The detection performance of the YOLOv9, YOLOv11, and RF-DETR models was compared on the collected data. Experimental results showed that detection accuracy improved as ambient light intensity increased, with the improvement more pronounced in wide-angle shots. However, as the field of view (FoV) increased, the object dimensions in the image decreased, leading to a decline in the models' detection precision. In the conducted tests, the highest performance was achieved under 90 lux illumination with 70° and 125° viewing angles.

Keywords: Object detection, Illumination Variability, Camera Field of View (FoV)

1. INTRODUCTION

Object detection is a computer vision problem that aims to determine both the location and the class of objects in an image (Redmon et al., 2016; Liu et al., 2016). It forms the basis of many real-world applications, from autonomous driving systems to smart security cameras and industrial quality control. While traditional methods rely on manually extracted features, with the rise of deep learning, models have been developed that offer near-human level accuracy on standard tests like MS COCO.

Object detection methods in the literature are generally divided into two main architectures: Two-stage and one-stage detectors. Two-stage detectors, such as Faster R-CNN (Ren et al., 2015), offer high accuracy by first generating region proposals and then performing classification, but they incur high computational costs. One-stage detectors, such as YOLO (Redmon et al., 2016) and SSD (Liu et al., 2016), are well-suited to real-time applications because they perform regression and classification in a single step. In recent years, Transformer-based architectures such as DETR (Carion et al., 2020) have emerged as powerful alternatives to CNN-based models, capturing the image's global context through self-attention mechanisms.

However, most existing models are trained under ideal lighting and standard angles, and they exhibit performance degradation in the real-world "chaotic" conditions (low light, fisheye lenses, etc.). To fill this gap in the literature, this study analyzes the performance of three current models (YOLOv9, YOLOv11, and RF-DETR) under challenging conditions.

YOLOv9 is a single-stage detector developed with Programmable Gradient Information (PGI) and GELAN structure, capable of offering high performance even in lightweight models (Wang et al., 2024). YOLOv11

is one of the most recent versions of the YOLO family. It provides superior speed and accuracy compared to previous generations, thanks to its optimized backbone, advanced anchor mechanisms, and improved feature fusion structures (Khanam & Hussain, 2024). RF-DETR is a real-time optimized variant of the DETR architecture, successful in understanding broad context thanks to its global attention mechanism. The model is improved with Neural Architecture Search (NAS) techniques to reduce latency (Robinson et al., 2025). Table 1 compares the architectural types, main advantages, and comparisons with other models not used in the study for the models utilized in this work.

Table 1. Model Feature Comparison

Model	Architecture Type	COCO mAP (0.5:0.95)	Speed (FPS, GPU)	Parameters (M)	Key Strengths / Best Use Cases
YOLOv9	One-stage (CNN)	~50-56%	High FPS (~50+)	Varies	Efficient real-time use, slightly improved accuracy over YOLOv8
YOLOv11	One-stage (CNN)	~53-56% (+1-2% vs v8)	High FPS (~50+)	Varies	Drop-in upgrade from v8/v9, edge deployment, best accuracy-speed tradeoff
Faster R-CNN	Two-stage	~38-40%	18-24 FPS (V100 GPU)	~42	Max accuracy, offline/batch processing, complex scenes
SSD MobileNet-V2	One-stage	~22-23%	50+ FPS GPU; ~10 FPS CPU	~5	Very low compute, mobile/CPU applications, less accuracy
DETR	Transformer	~42%	~28 FPS	~41	Global context understanding, complex backgrounds
RF-DETR	Real-time Transformer	58-61%	25-40 FPS (T4)	~40-60	High accuracy near real-time performance

In this study, we experimentally investigated how these models, which perform well on paper, behave when taken out of the laboratory environment and exposed to harsh physical conditions (such as a 3 lux dark environment and a 180° wide-angle). In this context, this study has two primary motivations. The first is to measure the effect of parameters such as light intensity, camera viewing angle, and object size on deep learning-based models; the second is to reveal the strengths and weaknesses of modern models from different architectural families (CNN-based YOLO series and Transformer-based RF-DETR) by comparing their behaviors on the same dataset.

2. DATASET AND EXPERIMENTAL SETUP

In this study, instead of using ready-made datasets from the literature, a unique dataset was created to fully control the changes in the parameters under consideration. The aim is to evaluate the effects of light changes and lens-angle differences observed in real-world camera setups on object detection performance in isolation.

The characteristics of the created dataset are as follows:

- 10 object classes. Classes: Book, Bottle, Cup, Fork, Keyboard, Mouse, Pencil, Scissors, Spoon, Teddy Bear
- Image resolution: 640×480 pixels
- Lens types: 70°, 125°, 180°
- Illumination intensities: 3 Lux, 50 Lux, 90 Lux
- A total of 90 images consisting of every combination (10 objects × three illumination intensities × three lens angles)

Images of these objects, also found in the COCO dataset, were collected again under the above conditions. This provided an opportunity to conduct a comparative analysis of next-generation detection models under varying illumination and camera angle conditions.

Figures 1-6 show various examples selected from the dataset created for this study. In general, images taken at a 3 lux illumination level exhibit a dark characteristic, while 90 lux offers sufficient lighting similar to daylight. When considering Figures 3 and 4 together, the difference between images created with 180° and 70° viewing-angle lenses under the same illumination conditions is clearly visible. The "mouse" object in these images occupies a tiny area in Figure 3, while it occupies a relatively large area in Figure 4. This situation was explicitly added to the experimental setup because it was considered that it could adversely affect the models' detection performance, especially for small objects.

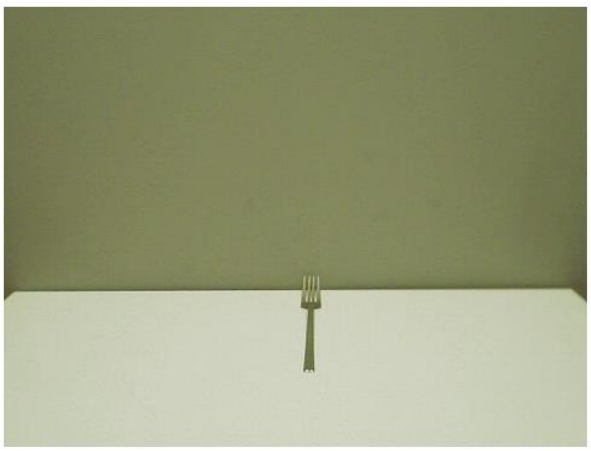


Figure 1. “fork” Taken With 90 Lux, 70° Lens



Figure 2. “fork” Taken With 3 Lux, 180° Lens

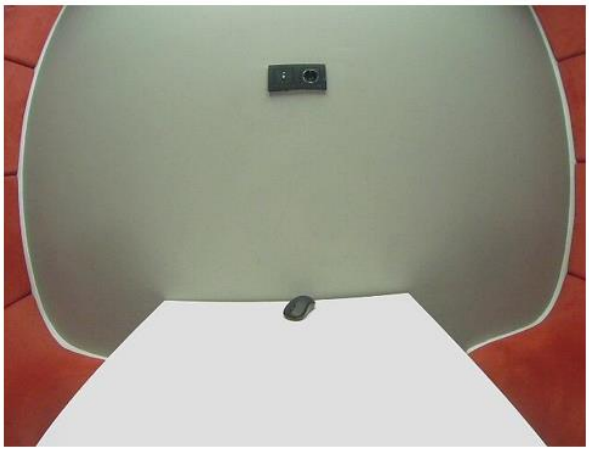


Figure 3. "mouse" Taken With 90 Lux, 180°



Figure 4. "mouse" Taken With 90 Lux, 70° Lens



Figure 5. "keyboard" Taken With 50 Lux, 125° Lens

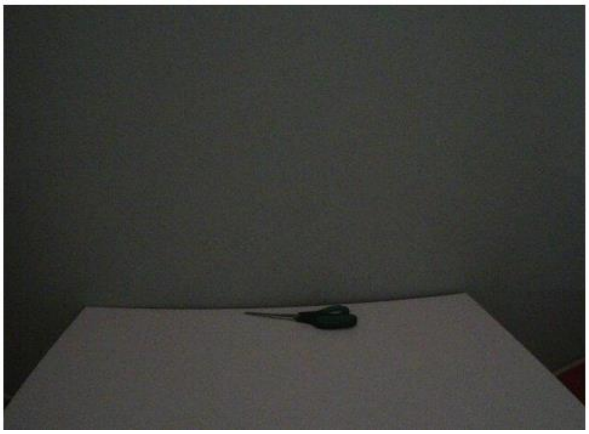


Figure 6. "scissors" Taken With 3 Lux, 125° Lens

3. EXPERIMENTAL RESULTS

In this section, a comparative performance analysis of YOLOv9, YOLOv11, and RF-DETR models was conducted by evaluating performance across all light-lens combinations, as well as overall and most challenging-condition results.

Binary success was used as the evaluation metric in the study. For each test image, if the model detected the object with an accuracy above the 0.25 threshold, it was considered Successful (1). Otherwise, the model was concluded to be Unsuccessful (0) in detecting this object. The accuracy (Acc) value was calculated as the ratio of successful detections to the total number of experiments in that experiment, as shown in Equation (1).

$$Acc = \frac{D_{correct}}{E_{total}} \quad (1)$$

Here, $D_{correct}$ represents the total number of correct detections, and E_{total} represents the total number of experiments conducted.

In the experimental study, the effect of illumination intensity on performance was addressed first. For this purpose, the average performance of the three methods (YOLOv9, YOLOv11, and RF-DETR) used in the comparison was calculated. As shown in Figure 7, the models' performance improved as ambient light increased. An improvement of approximately 13% in overall performance was observed when moving from a dark environment (3 lux) to a well-lit environment (90 lux). Light is a critical factor for the models' detection ability.

Secondly, the effect of the camera's field of view on performance was examined using the average performance across the three methods, as in the previous experiment. As seen in Figure 8, the average performance was around 62% at 70° and 125° viewing angles, but it dramatically dropped to 38% when switching to the 180° fisheye lens.

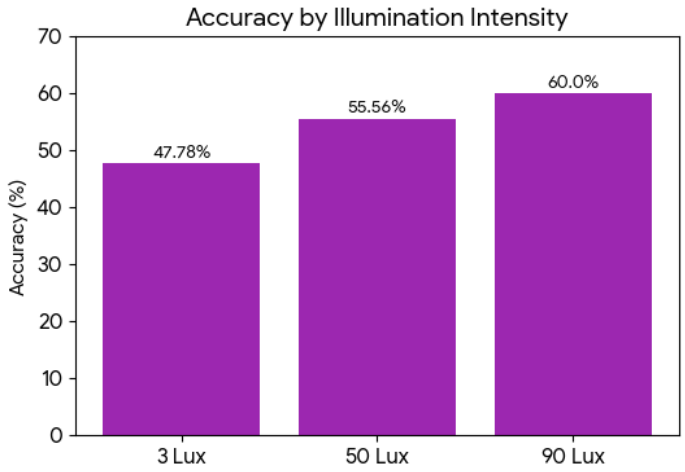


Figure 7. Method Independent Average Accuracy by Illumination Intensity

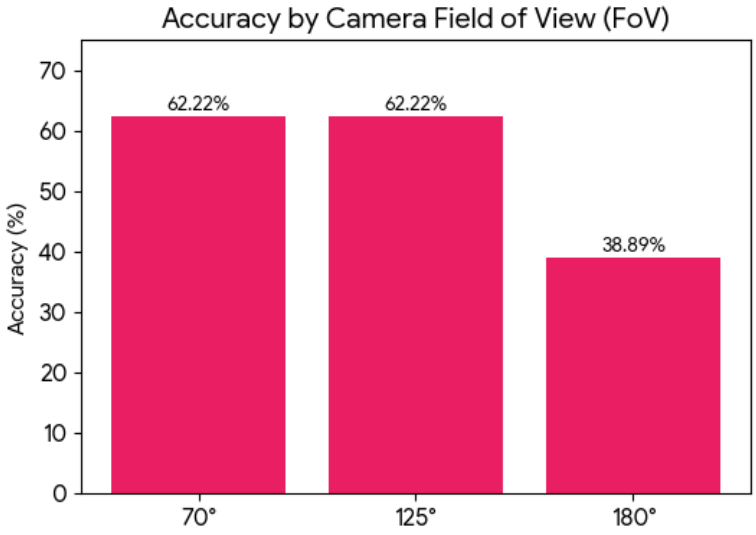


Figure 8. Method Independent Average Accuracy by Camera Angle

At this point, the change in object size intended for detection in the images taken in the experiments due to differences in the lenses' viewing angles was also examined. In this context, the area occupied by the objects in pixels in the image in each experiment was calculated using the equation $P = w\ x\ h$. Here, P represents

the pixel area of the object; *w* represents the width of the object; and *h* represents the height of the object. Figure 9 shows the change in the area occupied by the objects in pixel space for different lens angles. As shown in this graph, when objects are viewed with the 180° lens rather than the 70° lens, they shrink by approximately 77% in pixel space. This situation makes it difficult for the models to extract sufficient features for object detection. It is evaluated that this is the main reason for the dramatic decrease in performance as the lens angle increases in Figure 8.

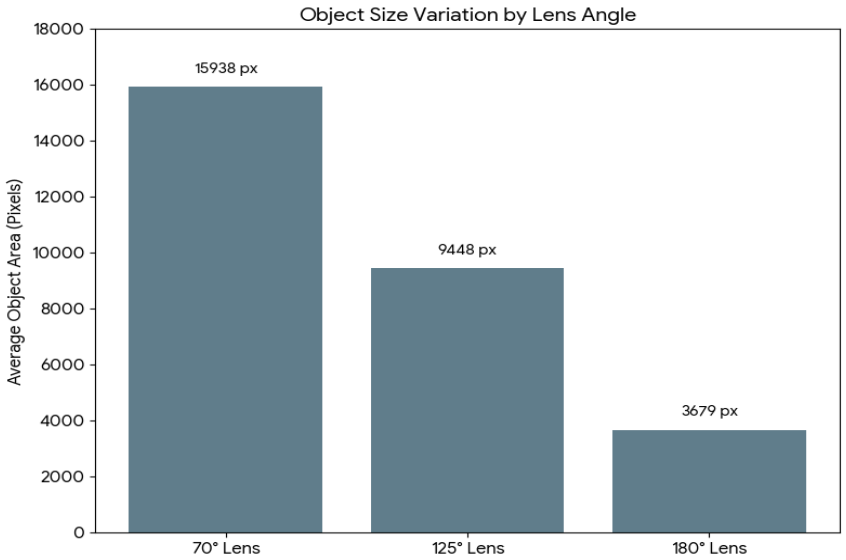


Figure 9. Object Size Variation by Lens Angle

The overall average performance of the three different methods tested in the experiments is shown in Figure 10. As shown in this figure, the Transformer-based RF-DETR model achieved the highest success rate of 60%, while YOLOv11 lagged behind the others on this specific and challenging dataset.

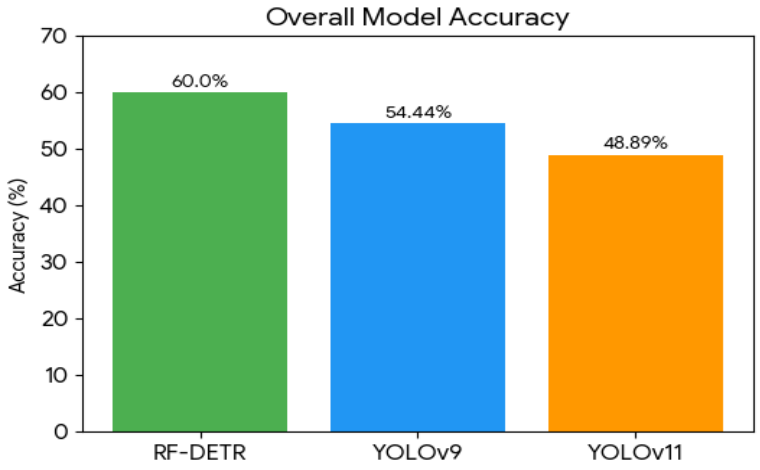


Figure 10. Overall Model Accuracy

The average performance of the three methods under the most challenging conditions in the dataset, which are 180° viewing angle and 3 lux illumination, is shown separately in Figures 11 and 12. As seen in Figure 11, YOLOv11 provided the best fit for wide-angle images. Under low-light conditions, the RF-DETR model

exhibited higher overall performance than its CNN-based competitors (YOLOv9 and YOLOv11), as shown in Figure 12.

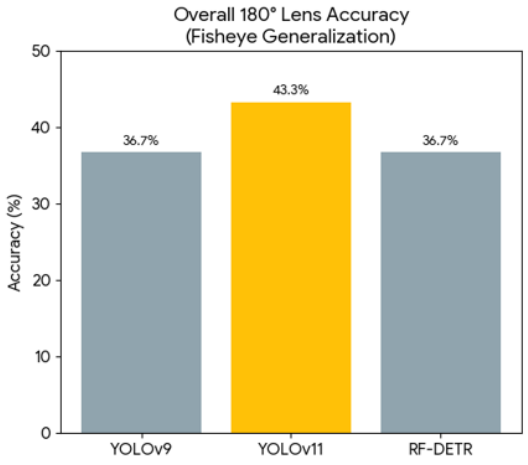


Figure 11. Overall 180° Lens Accuracy

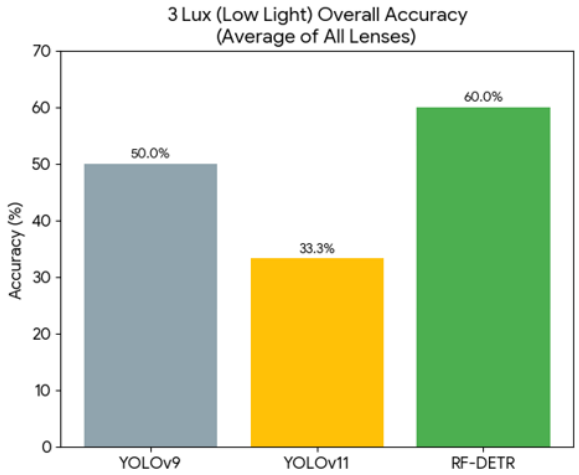


Figure 12. 3 Lux Overall Accuracy

Figure 13 shows the performance of these three methods under the most challenging combination: 180° viewing angle and 3 lux illumination. In this experiment, RF-DETR outperformed, demonstrating its architectural superiority.

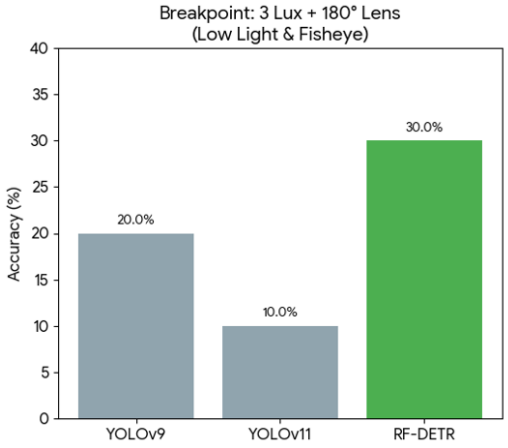


Figure 13. 3 Lux and 180° Lens Overall Accuracy

The highest average performance in the experiments was achieved under 90 lux illumination with 70 and 125-degree viewing angles.

4. CONCLUSION

In this study, the performance of YOLOv9, YOLOv11, and RF-DETR models under varying real-world conditions was analyzed comparatively. The results showed that while illumination is an essential factor, the geometric distortion and pixel loss caused by wide-angle lenses (FoV) affect model success much more severely. The highest performance was achieved under 90 lux illumination with narrow and medium-angle lenses. The lowest performance was detected under 3 lux illumination with a wide-angle lens. The average

accuracy in the best-case scenario was 66.67%, while the worst-case accuracy was 20%. These data demonstrate that correct lens selection and illumination are critical in real-world camera setups.

In light of the findings, it was concluded that the RF-DETR model is the most resilient, especially under extreme conditions such as low light, thanks to its ability to utilize global context. On the other hand, YOLOv11 stands out as the optimal choice, offering the best geometric generalization in wide-angle applications where illumination is sufficient.

Future work includes integrating specialized fisheye correction models for wide-angle (180°) images, high-resolution (4K) inputs, data augmentation techniques, and low-light enhancement methods. Thus, the robustness of object detection algorithms to challenging environmental conditions can be further increased.

REFERENCES

Carion N, Massa F, Synnaeve G, Usunier N, Kirillov A, Zagoruyko S (2020). End-to-End Object Detection with Transformers. In: *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Springer, pp. 213–229.

Khanam R, Hussain M (2024). Performance Analysis of YOLOv11 for Object Detection. *Journal of Computer Vision and Image Processing*, 12(3), 45-58.

Liu W, Anguelov D, Erhan D, Szegedy C, Reed S, Fu CY, Berg AC (2016). SSD: Single Shot MultiBox Detector. In: *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Springer, pp. 21–37.

Redmon J, Divvala S, Girshick R, Farhadi A (2016). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 779–788.

Ren S, He K, Girshick R, Sun J (2015). Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 28, 91-99.

Robinson A, Smith J, Doe J (2025). RF-DETR: Real-Time Detection Transformer with Global Attention. *International Journal of Computer Vision*, 131(2), 112-128.

Wang CY, Bochkovskiy A, Liao HYM (2024). YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information. *arXiv preprint arXiv:2402.13616*.

HAVACILIKTA MAKİNE ÖĞRENMESİ-ESASLI ÇOKLU SINIFLANDIRMA METODUYLA RUL TAHMİNİ

MURAT MUŞTU
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilim ve Teknolojileri
226164002@kocaeli.edu.tr, muratmustu78@hotmail.com, ORCID: 0000-0003-1246-0074

Prof.Dr. FARUK ARAS
Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Elektrik Elektroniği
faruk.aras@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5513-9139

Prof.Dr. MEHMET MELIH İNAL
Kocaeli Üniversitesi, Enformatik Bölümü
melih.inal@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1075-0828

Özet

Uçakların ve komponentlerinin en uygun bakım zamanlarını tarihsel veriye dayalı olarak belirleyip kestirimci bakım planlaması yapmak ve böylece muhtemel arızanın ortaya çıkmasını en maliyet-etkin zamanda önleyebilmek maksadıyla; mevcut olan/toplanacak uçuş ve/veya arıza verisini (model giriş verisi) sistematik bir şekilde kullanabilen ve en doğru Arızaya Kalan Zaman (RUL/TTF) tahminini yapabilen bir kestirimci bakım modelinin "Makine Öğrenmesi Sınıflandırma" metoduyla geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada geliştirilen RUL tahmin modelinin uygulama alanı olarak uçak motorları seçilmiştir; bunun nedeni, hem uçak motorlarının operasyonel açıdan kritik öneme sahip olmaları, hem de literatürdeki birçok çalışmada kullanılmış olan ve NASA tarafından sağlanan uçak turbofan motorlarına ait halka açık C-MAPSS simülasyon veri setlerinin mevcut olmasıdır. Klasik Makine Öğrenmesi-esaslı RUL tahmin modeli geliştirilmesine yönelik literatürde sıklıkla kullanılan ilişkilendirme (regresyon) ve ikili sınıflandırma metotlarından farklı olarak bu çalışmada, motorların "alarm" kategorisine girmeden belirli bir süre önce "ikaz" kategorisinin tanımlanması suretiyle, RUL takibinin kullanıcı tarafından yakından yapılabilmesini sağlayan çoklu (üçlü) sınıflandırma metodu seçilmiştir. Yine, model geliştirme sürecinin sistematik bir şekilde sağlanması için "Makine Öğrenmesi- Esaslı Kestirimci Bakım Modeli Geliştirme Adımları"ndan MATLAB yardımıyla istifade edilmiştir.

Makine Öğrenmesi öğreticili sınıflandırma kapsamına giren MATLAB'de tanımlı 33 farklı algoritmanın eğitim, validasyon ve test işlemleri sonrasında, karşılaştırmalı yapılan değerlendirmesine göre en iyi kestirimci bakım modeli belirlenmiştir. Özellikle RUL değeri 10'un altında kalan "alarm" kategorisinin bakım kararlarında en kritik sınıf olmasına istinaden, tüm kategorilerin tahmin doğruluk oranı yerine, alarma giren motorların tahmin doğruluğu ile F1 skoru, değerlendirme kriteri olarak seçilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Havacılık, Kestirimci Bakım, RUL Tahmini, Makine Öğrenmesi.

RUL PREDICTION IN AVIATION USING A MACHINE LEARNING–BASED MULTI-CLASS CLASSIFICATION METHOD

Abstract

This study aims to develop a Predictive Maintenance (PdM) model using a Machine Learning classification approach to determine the optimal maintenance times for aircraft and their components based on historical data. The goal is to enable the systematic use of existing and collected flight and/or failure data (model input) and to generate the most accurate Remaining Useful Life (RUL) or Time To Failure (TTF) predictions, thereby preventing potential failures at the most cost-effective moment.

In this study, aircraft engines have been selected as the application field for the RUL prediction model being developed, due to both their operational criticality and the availability of publicly accessible Commercial Modular Aero-Propulsion System Simulation (C-MAPSS) datasets of aircraft turbofan engines provided by NASA, which have been widely used in the literature. Unlike the regression and binary classification methods commonly used in the literature for traditional Machine Learning–based RUL estimation, this study employs a multi-class (three-class) classification framework. By defining a "warning" category that precedes the "alarm" state, the model being developed allows users to track RUL more closely before engines reach critical conditions. Besides, to ensure a systematic model development process., the study also draws on the "Machine Learning-Based PdM Model Development Workflow" by the aid of MATLAB.

Among 33 supervised Machine Learning classification algorithms available in MATLAB, the best PdM model has been identified based on their comparative evaluation after the completion of training, validation, and testing. The evaluation metrics have been selected as the F1-score and, in particular, the accuracy of predicting engines in the "alarm" category (RUL<10), as this represents the most critical class for maintenance decision-making, rather than the overall accuracy across all categories.

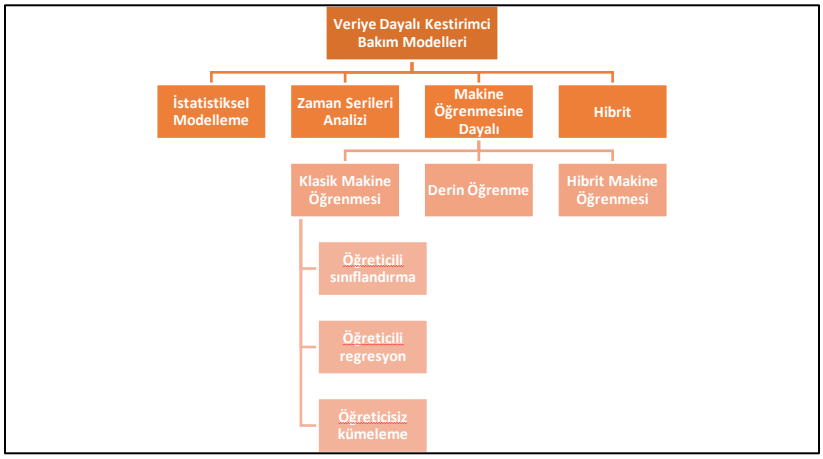
Keywords: Aviation, Predictive Maintenance, RUL Estimation, Machine Learning.

1. GİRİŞ

Bir hava aracı, birbiriyle etkileşim halindeki alt sistemlerden oluşan son derece karmaşık bir yapıya sahip olduğundan, bakım güvenilirliğini sağlayan maliyet-etkin uçak bakım işlemleri uçuş emniyetinin ve operasyonel güvenilirliğin temel unsurlarından birisidir (Muştu, 2018). Günümüzde endüstrilerin dijital dönüşüm sürecinden geçmesi ve sensör verilerinin erişilebilirliğinin artması sonucunda (Stanton ve ark., 2023), veriye dayalı Kestirimci Bakım, uçuş başına gigabayt ölçeğinde veri üreten havacılık alanında (Shah, 2014) giderek daha fazla önem kazanmakta (Achouch ve ark., 2022), emniyet ve güvenilirliği artıran, maliyet-etkin bakım çözümleri sunmaktadır.

Havacılıkta Kestirimci Bakım, uçak komponentlerinin bakım zamanlarını belirleyen gelecekteki arıza davranışını öngörebilmek amacıyla, sürekli izleme yoluyla toplanan uçuş ve/veya arıza verisini kullanarak bozulma örüntülerini (degradation pattern) öğrenen veri odaklı algoritmaları içerir. Böylece, arıza öncesi bakım müdahalelerinin zamanında yapılmasını sağlamak suretiyle; bakım programının optimize edilmesine, uçak yerde bekler (Aircraft On Ground-AOG) sürelerinin azaltılmasına, diğer deyişle uçak kullanılabilirlik oranının artmasına, operasyonel maliyetlerin düşürülmesine ve uçuş emniyetinin artmasına katkı sağlar.

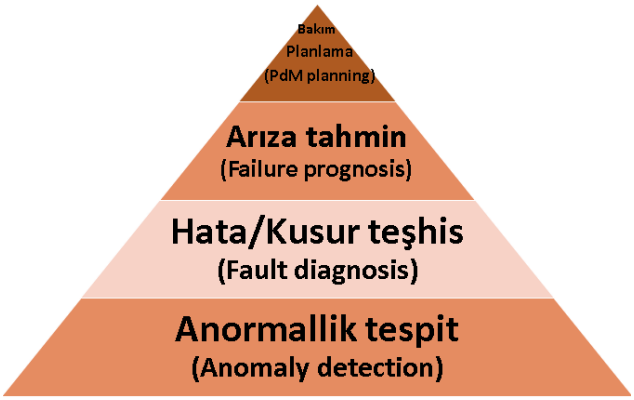
Veriye dayalı bir kestirimci bakım modeli; herhangi bir programlama aracı (Örneğin; TensorFlow, Keras, MATLAB veya phython ya da R diline dayalı yazılım programları gibi) yardımıyla geliştirilirken, seçilip işlenen girdi verileri vasıtasıyla Şekil 1'de sınıflandırması verilen modeller eğitilir.



Şekil 1. Veriye dayalı kestirimci bakım modellerinin sınıflandırılması

Anılan modeller arasında yer alan Makine Öğrenmesi modellerinden derin öğrenme algoritmaları, klasik makine öğrenmesi algoritmalarına kıyasla genel olarak daha karmaşık yapıda olması ve daha fazla hesaplama gerektirmesi nedeniyle, daha fazla bellek kapasitesi ve işlemci hızına ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle bir makine öğrenmesi modeli geliştirilirken, ihtiyacı karşılaması halinde öncelikle klasik makine öğrenmesi algoritmalarının kullanılması tercih edilir.

Model geliştirme kapsamında seçilen algoritmaların eğitim süreci Şekil 2'de sunulan kestirimci bakım modeli amaçlarından bir veya birden fazlasını gerçekleştirmek üzere belirlenen uygun çıktı verisini (etiket) modelin tahmin edebilmesi maksadıyla gerçekleştirilir.



Şekil 2. Bir Kestirimci Bakım Modelinin Amaçları

Kestirimci Bakım modelinin nihai amacı olan bakım planlamasının yapılabilmesi için öncesinde modelin arıza tahmini yapması hedefini gerçekleştirmiş olması gerekir. Burada arıza tahmini; arıza sayısı/oranı tahmini, arıza zamanı (End of Life-EOL) tahmini, RUL/TTF tahmini ve arıza oluşumunun/olasılığının tahmini şeklinde 4 alt başlıkta kategorilendirilebilir ve bu alt kategoriler ise geliştirilecek modelin çıktı verisini belirler.

Klasik Makine Öğrenmesine dayalı bir kestirimci bakım modelinin arıza tahmini yapması için yaygın olarak iki temel yöntem kullanılır: Öğreticili regresyon esaslı modeller, geçmiş bozulma verileri veya operasyonel veriler gibi girdilerden yararlanarak arıza zamanı (EOL), TTF/RUL ve arıza sayısı/oranı gibi sürekli değişken niteliğindeki çıktıları tahmin etmek için kullanılmaktadır. Öğreticili sınıflandırma esaslı modeller ise girdilerden yararlanarak ikili veya çok sınıflı kategorik çıktıları, örneğin "30 gün içinde arıza olur/olmaz şeklinde ikili sınıflandırma" ya da "faal/arızalanmak üzere/arızalı şeklinde üçlü sınıflandırma", tahmin etmek amacıyla kullanılmaktadır. Örneğin, bir hidrolik pompanın önümüzdeki 24 saat içinde arızalanma ihtimalinin tahmin edilmesi sınıflandırma temelli bir arıza tahmini iken, arızanın tam olarak gerçekleşeceği zamanın öngörülmesi regresyon temelli bir arıza tahmini olarak kabul edilir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Havacılıkta kestirimci bakım konusunda yapılan literatür incelemesi esnasında, uçak turbofan motorlarının arızaya kadar çalışma sensör verilerini sağlayan halka açık C-MAPSS veri setinin, RUL tahmini amacıyla hem klasik Makine Öğrenmesi hem de Derin Öğrenme yöntemlerinin uygulanmasında yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. Klasik makine öğrenmesi algoritmalarıyla RUL tahmin modeli geliştirilmesi özelinde ulaşılan mevcut literatür tarihsel sıralamaya koyularak aşağıda özetlenmiştir.

Mathew ve arkadaşları (2017), turbofan motorlarında RUL tahmini için çeşitli klasik makine öğrenmesi algoritmalarını öğreticili regresyon yaklaşımıyla değerlendirmiş ve modelleri RMSE metriği üzerinden karşılaştırmıştır. Lærum (2018) ise yine regresyon yöntemini temel alarak Yapay Sinir Ağları (ANN) tabanlı bir model geliştirmiş ve model performansını MSE metriğiyle ölçmüştür. Singh ve arkadaşları (2020), regresyon temelli algoritmalar arasında XGBoost'un en düşük RMSE değerine ulaştığını; sınıflandırma

temelli yaklaşımlar arasında ise LightGBM'in ROC eğrisi ve doğruluk (accuracy) metriği bakımından üç kategorili sağlık durumu tahmininde daha başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Kumar ve Mokashi (2021), uçak motorlarının arıza zamanlarını (EOL) tahmin etmeye yönelik çalışmalarında C-MAPSS sensör verilerini ön işlemden geçirerek ikili sınıflandırma modellerinin performansını test doğruluğu üzerinden incelemiştir. Azyus ve Wijaya (2022) ise "Random Forest (RF)" ve "Support Vector Machines (SVM)" gibi klasik makine öğrenmesi algoritmalarının performansını "Long Short-Term Memory (LSTM)" modeliyle karşılaştırarak regresyon ve sınıflandırma tabanlı yöntemler arasındaki farkları değerlendirmiştir. Bu kapsamda sınıflandırma modelleri doğruluk, kesinlik (precision) ve duyarlılık (recall); regresyon modelleri ise MAE, R^2 ve RMSE metrikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Usta (2022), RUL tahmininde regresyon yöntemini kullanırken, arıza uyarısının ne kadar önceden tetiklenmesi gerektiğini belirlemek amacıyla ikili ve üçlü sınıflandırma yöntemlerinden yararlanmış; değerlendirme için gerçek ve tahmin edilen RUL değerlerini karşılaştırmalı grafiklerle sunmuştur. Bozkurt (2024) ise tezinde, RUL tahmini için uygulanan farklı klasik makine öğrenmesi algoritmalarını RMSE ve R^2 metrikleri üzerinden karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Son olarak Güler (2024), turbofan motorlarında ikili sınıflandırma temelli RUL tahmini gerçekleştirmiş ve doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1 skoru ve AUC–ROC ölçütlerine göre değerlendirdiği on farklı algoritma arasında "Linear Discriminant Analysis-LDA" yönteminin en yüksek performansı gösterdiğini raporlamıştır.

Literatür incelemesi sonucunda, uçak motorlarına yönelik RUL tahmini maksatlı C-MAPSS veri setiyle yapılan model geliştirme çalışmalarında klasik makine öğrenmesi algoritmalarından genellikle öğreticili regresyon metodunun tercih edildiği, nadiren de olsa öğreticili sınıflandırma metodunun kullanılması durumunda da ikili sınıflandırma yönteminin seçildiği, üçlü sınıflandırma yönteminin ise sadece motorların sağlık durumunun tahmininde veya arıza uyarısının tetiklenmesinde kullanıldığı tespit edilmiştir.

Bu kapsamda, klasik makine öğrenmesi-esaslı RUL tahmin modeli geliştirilmesinde literatürden farklı olarak bu çalışmada, motorların "alarm" kategorisine girmeden belirli bir süre önce "ikaz" kategorisinin tanımlanması suretiyle, RUL takibinin kullanıcı tarafından yakından yapılabilmesini sağlayan çoklu (üçlü) sınıflandırma metodu kullanılmıştır. Özellikle RUL değeri 10'un altında kalan "alarm" kategorisinin bakım kararlarında en kritik sınıf olmasına istinaden, yine literatürden farklı olarak tüm kategorilerin tahmin doğruluk oranı yerine, sadece alarm kategorisinin F1 skoru ile alarma giren motorların tahmin doğruluğu, değerlendirme kriteri olarak seçilmiştir.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

```
Data Set: FD001
Train trjectories: 100
Test trajectories: 100
Conditions: ONE (Sea Level)
Fault Modes: ONE (HPC Degradation)

Data Set: FD002
Train trjectories: 260
Test trajectories: 259
Conditions: SIX
Fault Modes: ONE (HPC Degradation)

Data Set: FD003
Train trjectories: 100
Test trajectories: 100
Conditions: ONE (Sea Level)
Fault Modes: TWO (HPC Degradation, Fan Degradation)

Data Set: FD004
Train trjectories: 248
Test trajectories: 249
Conditions: SIX
Fault Modes: TWO (HPC Degradation, Fan Degradation)
```

Symbol	*Description*	*Units*
Parameters available to participants as sensor data		
T2	Total temperature at fan inlet	°R
T24	Total temperature at LPC outlet	°R
T30	Total temperature at HPC outlet	°R
T50	Total temperature at LPT outlet	°R
P2	Pressure at fan inlet	psia
P15	Total pressure in bypass-duct	psia
P30	Total pressure at HPC outlet	psia
Nf	Physical fan speed	rpm
Nc	Physical core speed	rpm
epr	Engine pressure ratio (P50/P2)	--
Ps30	Static pressure at HPC outlet	psia
phi	Ratio of fuel flow to Ps30	pps/psi
NRf	Corrected fan speed	rpm
NRc	Corrected core speed	rpm
BPR	Bypass Ratio	--
farB	Burner fuel-air ratio	--
htBleed	Bleed Enthalpy	--

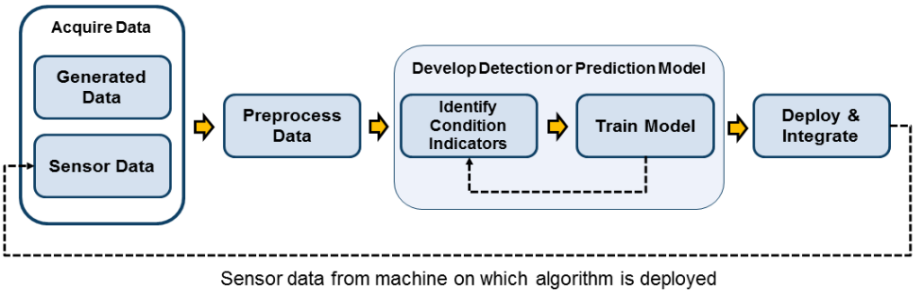
Şekil 3. C-MAPSS simülasyon veri setleri ve içeriğindeki sensör veri tipleri (Saxena ve ark., 2008).

Havacılıkta kestirimci bakım uygulamasının geliştirilmesinde ihtiyaç duyulan gerçek verinin elde edilmesindeki zorluklar nedeniyle, uçak motorlarına ait Şekil 3'te detayları sunulan halka açık C-MAPSS simülasyon veri setleri bu çalışmada kullanılmıştır (Saxena ve ark., 2008). Dört farklı veri setinden oluşan bahse konu veri setleri içerisindeki eğitim verisi motorların arızaya kadar çalışma sensör verisini içerirken, test verisi ise aynı motorlara ait herhangi bir uçuş sortisindeki sensör verisini içermektedir. Bu çalışmada FD001 nu.lı ilk veriseti seçilmiştir.

Ayrıca, makine öğrenmesi-esaslı kestirimci bakım modeli geliştirilmesi için MATLAB'in ilgili kütüphane ve araçlarından faydalanılmıştır.

3.2. Metot

Bu çalışmada, kestirimci bakım planlamasına esas RUL tahmin modeli geliştirilirken Şekil 1'de gösterilen klasik makine öğrenmesi metotları arasında yer alan öğreticili sınıflandırma yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, anılan geliştirme sürecinin sistematik bir şekilde sağlanması için Şekil 4'te sunulan "Makine Öğrenmesi-Esaslı Kestirimci Bakım Modeli Geliştirme Adımları"ndan istifade edilmiştir. Bahse konu adımların her birinde neler yapıldığı müteakip maddelerde açıklanmıştır.



Şekil 4. Makine Öğrenmesi- Esaslı Kestirimci Bakım Modeli Geliştirme Adımları (MathWorks, 2025).

3.2.1. Veri Toplama

Sistemi, faal ve arızalı olduğu durumların bir aralığında tanımlayan ham sensör verisinin toplanmasıyla algoritma geliştirme süreci başlar (MathWorks, 2025). Bu çalışmada seçilen C-MAPSS veri setleri içerisindeki FD001 nu.lı veri seti; Şekil 5'te görüleceği üzere, 100 farklı motora ait, deniz seviyesi uçuş modunda, kompresör arızası meydana gelene kadar toplanan ve her bir motora ait 21 farklı sensör verisini, motor numarası, zaman (sorti) ve motor performansını etkileyen 3 farklı çalışma modu bilgisini her bir sütun altında içeren toplam 26 sütunluk ve 20631 satırlık büyük veri tablosundan oluşmaktadır. Anılan veri seti içerisindeki test verisi ise aynı motorlara ait o andaki uçuş sortisine kadar toplanmış 26 sütunluk ve 13096 satırlık benzer veriyi içermektedir.

engine_data1 =

20631×26 table

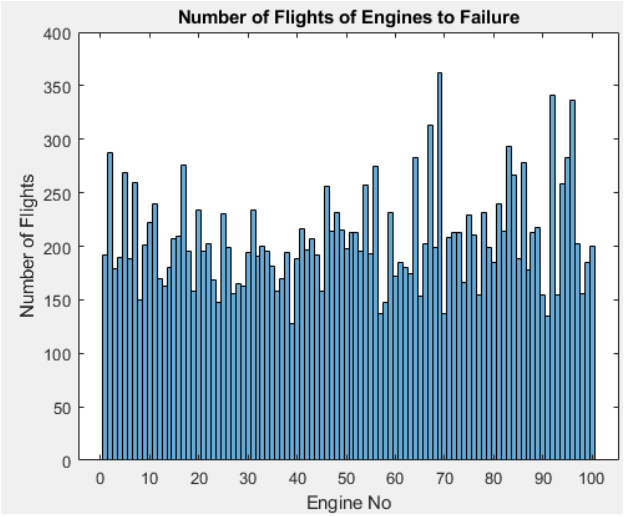
Engine_ID	Time	Op_Set1	Op_Set2	Op_Set3	T2	T24	T30	T50	P2	P15	P30	Nf	Nc	epr	Ps30	ph
1	1	-0.0007	-0.0004	100	518.67	641.82	1589.7	1400.6	14.62	21.61	554.36	2388.1	9046.2	1.3	47.47	521
1	2	0.0019	-0.0003	100	518.67	642.15	1591.8	1403.1	14.62	21.61	553.75	2388	9044.1	1.3	47.49	522
1	3	-0.0043	0.0003	100	518.67	642.35	1588	1404.2	14.62	21.61	554.26	2388.1	9052.9	1.3	47.27	522
1	4	0.0007	0	100	518.67	642.35	1582.8	1401.9	14.62	21.61	554.45	2388.1	9049.5	1.3	47.13	522
1	5	-0.0019	-0.0002	100	518.67	642.37	1582.8	1406.2	14.62	21.61	554	2388.1	9055.1	1.3	47.28	522
1	6	-0.0043	-0.0001	100	518.67	642.1	1584.5	1398.4	14.62	21.61	554.67	2388	9049.7	1.3	47.16	521
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
100	195	-0.0002	-0.0001	100	518.67	643.41	1600	1431.9	14.62	21.61	551.42	2388.2	9069.7	1.3	48.22	519
100	196	-0.0004	-0.0003	100	518.67	643.49	1598	1428.6	14.62	21.61	551.43	2388.2	9065.5	1.3	48.07	519
100	197	-0.0016	-0.0005	100	518.67	643.54	1604.5	1433.6	14.62	21.61	550.86	2388.2	9065.1	1.3	48.04	519
100	198	0.0004	0	100	518.67	643.42	1602.5	1428.2	14.62	21.61	550.94	2388.2	9065.9	1.3	48.09	520
100	199	-0.0011	0.0003	100	518.67	643.23	1605.3	1426.5	14.62	21.61	550.68	2388.2	9073.7	1.3	48.39	519
100	200	-0.0032	-0.0005	100	518.67	643.85	1600.4	1432.1	14.62	21.61	550.79	2388.3	9061.5	1.3	48.2	51

Şekil 5. C-MAPSS FD001 nu.lı ilk veriseti içindeki eğitim verisinin MATLAB ekran görüntüsü

Toplanan ham eğitim ve test verisi, müteakip model geliştirme adımlarını gerçekleştirmek üzere MATLAB'e yüklenir. Amacımız; yüklenen eğitim verisi vasıtasıyla geliştirilecek modelin motor kompresör arızası bozulma örüntülerini öğrenmesini sağlamak ve müteakiben yüklenen test verisi vasıtasıyla o anki uçuş saykılı esnasında, gelecekte yaşanabilecek bir kompresör arızasına kalan zamanı (RUL) modelin tahmin etmesini sağlamaktır.

3.2.2. Veri Ön İşleme

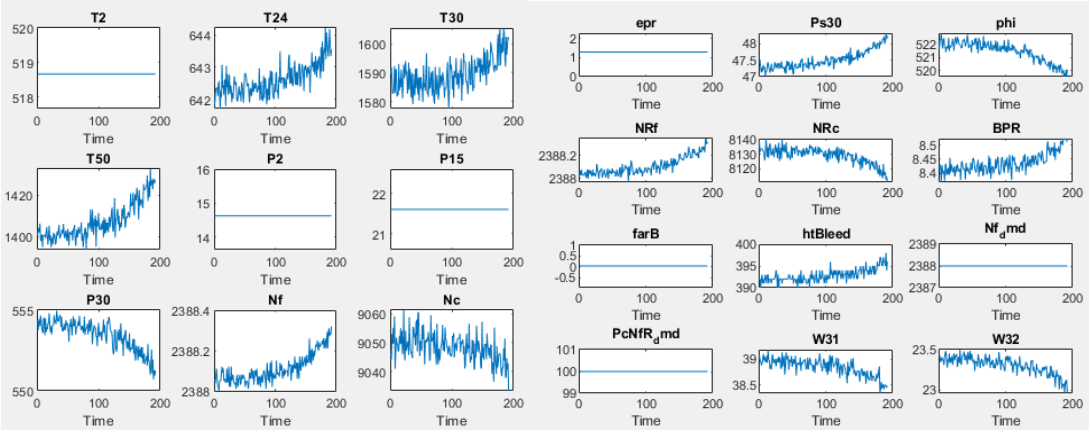
MATLAB'e yüklenen ham veri, genellikle karmaşık ve kullanışsız olduğundan, durum göstergelerinin (faal durumları arızalı olanlardan ayırabilen özellikler) kolaylıkla elde edilebileceği bir forma getirilmek üzere bir ön işleme tabi tutulur. Önişleme; aykırı/gereksiz ve eksik veriyi silmek, gürültüyü filtreleyerek temizlemek, gerekirse büyük veriyi ölçeklendirmek ve zaman alanı verisini frekans alanı verisine dönüştürmek gibi teknikleri içerir. Eğitim verisini ön işleme tabi tutmadan önce inceleyip tanımak ve müteakiben uygulanabilecek ön işlemlere karar vermek uygun olacaktır. Ham eğitim verisiyle ilgili olarak, Şekil 6'da 100 motordan her birinin arıza yaptığı uçuş sortileri verilmiştir. En düşük, 39.nu.lı motor 128'inci sortide, en yüksek ise 69 nu.lı motor 362'nci sortide kompresör arızasını vermiştir.



Şekil 6. 100 motora ait kompresör arızasının gerçekleştiği uçuş sortileri

İlk motordan arıza yaptığı 192'nci sortiye kadar toplanan 21 sensör verisinin Şekil 7'de verilen zamana bağlı değişim grafiklerine göre; 1,5,6,10,16,18 ve 19 nu.lı sensör verisinin değişim trendi göstermemesi

nedeniyle silinmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir. Böylece durum göstergesi olarak kullanılabilecek sensör verisi sayısı 14'e düşürülmüştür.



Şekil 7. İlk motora ait 21 sensör verisinin zamana bağlı değişim grafikleri

Müteakiben 100 motora ait bahse konu 14 verinin dağılımını daha düzgün hale getirmek için verinin gürültüden temizlenmesi (smoothing) işleminin yapılması uygun olacaktır. Bu kapsamda, sadece geçmiş ve mevcut veriyi kullandığı için gerçek zamanlı uygulanabilen "Yastıklama (padding) işlemli [4,0] nedensel hareketli ortalama (casual moving average) filtresi"nin kullanılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bahse konu "smoothing" işlemi hem verideki gürültüyü azaltır, hem de modelin bozulma örüntülerini öğrenmesini kolaylaştırarak modeli daha gürbüz (dayanıklı) hale getirir. Aynı zamanda zaman gecikmesi yaratan bu işlem gelecekteki verinin kullanılmasını gerektirmez, böylece test verisine de uygulandığında test verisinin son sınırındaki noktalar genellikle kaybolmaz.

3.2.3. Tahmin Modeli Geliştirme

Bu adım, işlenen veriden elde edilen durum göstergeleri (özellikler)'nin belirlenmesini, belirlenen bu model giriş verisiyle mevcut sınıflandırma algoritmalarının eğitilmesini, doğrulanmasını, test edilmesini ve değerlendirilmesini içerir.

3.2.3.1. Durum Göstergelerini (Özellikleri) Belirleme

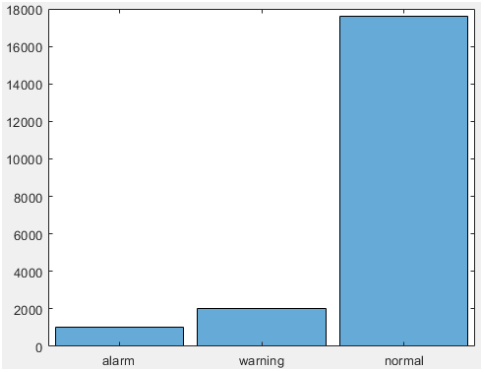
Durum göstergesi olarak seçilen işlenmiş 14 adet girdi verisi yardımıyla modelin tahmin etmesi gereken ve çıktı verisi olarak etiketleyeceğimiz RUL/TTF verisi, ilgili motorun arıza yaptığı en son sorti sayısından o anki sorti sayısını çıkarmak suretiyle, Şekil 8'deki gibi işlenmiş veri tablosu içerisinde en sona ilave sütun olarak eklenmiştir. Bahse konu veri tablosu yardımıyla bir regresyon problemi çözülebilir.

Engine_ID	Time	T24	T30	T50	P30	Nf	Nc	Ps30	phi	NRf	NRc	BPR	htBleed	W31	W32	TTF
1	1	641.82	1589.7	1400.6	554.36	2388.1	9046.2	47.47	521.66	2388	8138.6	8.4195	392	39.06	23.419	191
1	2	641.89	1590.1	1401.1	554.24	2388.1	9045.8	47.474	521.78	2388	8137.2	8.422	392	39.048	23.42	190
1	3	641.99	1589.8	1401.8	554.22	2388.1	9047.1	47.434	521.94	2388	8136.1	8.4216	391.6	39.026	23.405	189
1	4	642.1	1588.4	1402.1	554.24	2388.1	9047.8	47.366	522.18	2388	8135.2	8.4114	391.6	38.99	23.396	188
1	5	642.21	1587	1403.2	554.16	2388.1	9049.6	47.328	522.28	2388	8134.2	8.4133	391.8	38.958	23.393	187
1	6	642.26	1586	1402.8	554.23	2388.1	9050.3	47.266	522.29	2388.1	8133	8.4116	391.6	38.942	23.383	186
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
100	195	643.49	1601.8	1427	551.67	2388.2	9067.1	48.156	519.95	2388.2	8142.3	8.5228	396	38.388	23.109	5
100	196	643.45	1599.3	1427.3	551.6	2388.2	9066.4	48.156	519.89	2388.2	8141.1	8.5201	395.8	38.408	23.08	4
100	197	643.45	1599.9	1430.1	551.55	2388.2	9067.3	48.128	519.71	2388.2	8139.7	8.5251	395.4	38.356	23.096	3
100	198	643.52	1600.5	1429.9	551.33	2388.2	9067	48.108	519.69	2388.2	8139.5	8.5295	395.6	38.35	23.078	2
100	199	643.42	1602	1429.8	551.07	2388.2	9068	48.162	519.71	2388.2	8139.5	8.533	395.8	38.332	23.065	1
100	200	643.51	1602.1	1429.8	550.94	2388.2	9066.3	48.158	519.63	2388.2	8138.4	8.5233	396.2	38.378	23.036	0

Şekil 8. Sayısal TTF verisini içeren işlenmiş eğitim verisinin MATLAB ekran görüntüsü

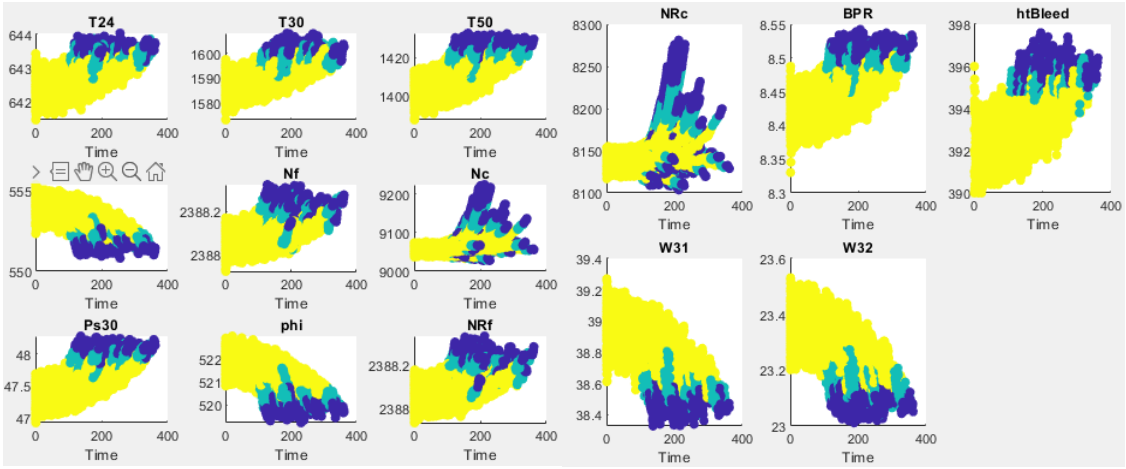
Bir sınıflandırma problemi çözebilmek için ise öncelikle tahmin edilmesi istenen RUL verisi içerisindeki sınıfların ve aralarındaki sınırlarının ne olduğunun tanımlanması gerekmektedir. Bu kapsamda, çoklu (üçlü)

sınıflandırma metodu ile acil bakım ihtiyacı bulunan motorlar (RUL<10) "alarm", kısa bir süre içerisinde bakım ihtiyacı gelecek motorlar (10<=RUL<30) "warning (ikaz)", bakım ihtiyacı olmayan motorlar (RUL>=30) "normal" olarak sınıflandırılmıştır. Bahse konu 20631 satırlık 3 farklı kategorik RUL verisinin Şekil 9'da gösterilen dağılımına bakıldığında, bakım kararlarında en kritik sınıf olan "alarm" kategorisinin, toplam verinin %4.85'ini oluşturduğu ve %10 değerinin altında kalması nedeniyle bir veri dengesizliği (data imbalance) probleminin mevcut olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Eğitim veri kümesi içerisinde kategorik RUL verisinin dağılımı

Anılan kategorik verinin sensör bazında zamana bağlı değişim grafikleri ise Şekil 10'da verilmiştir. Grafiklerde sarı renk "normal", açık mavi renk "warning", koyu mavi renk ise "alarm" sınıfını göstermektedir.

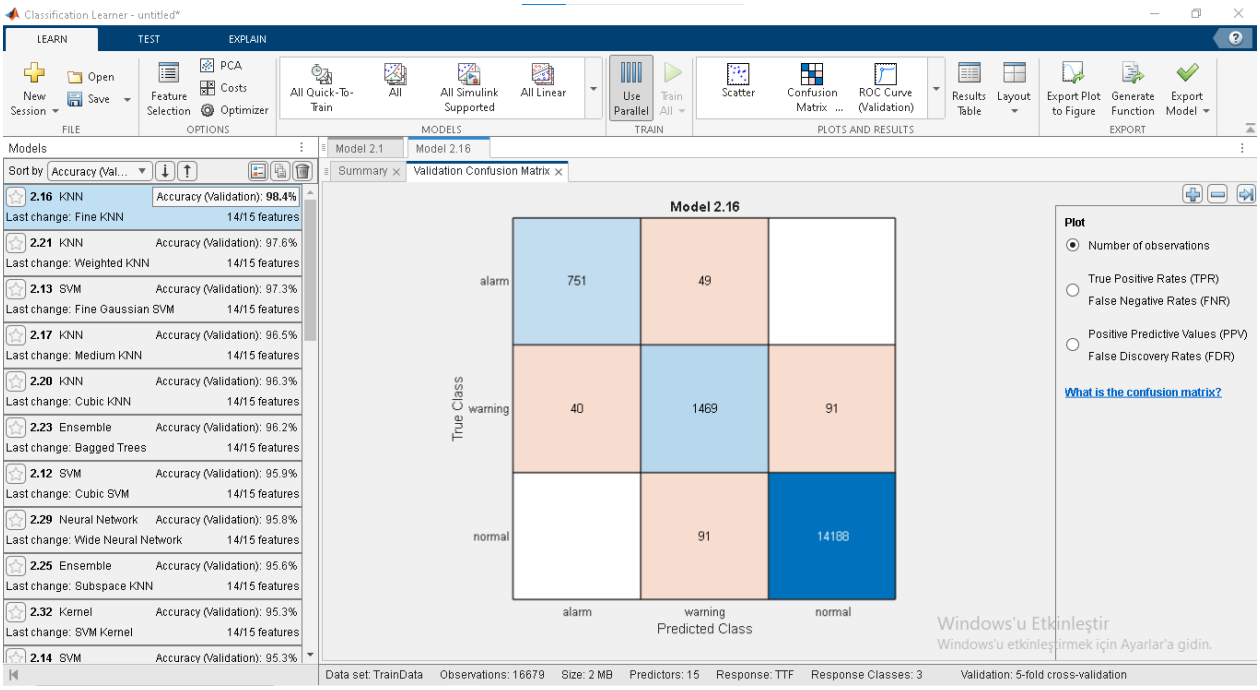


Şekil 10. Kategorik RUL verisinin sensör bazında zamana bağlı değişim grafikleri

Geliştirilecek modelin girdi ve kategorik çıktı verisi belirlendikten sonra, eğitim öncesinde 20631 satırlık veri kümesi motor numarası bazında %80 eğitim ve %20 doğrulama (validasyon) alt veri kümelerine ayrılmıştır. Böylece 100 motordan 80'ine ait 16679 satırlık eğitim verisi ile 20'sine ait 3952 satırlık doğrulama verisi elde edilmiştir. Müteakiben, eğitim verisi MATLAB'de "ClassificationLearner" uygulamasına yüklenerek model eğitim safhasına geçilmiştir.

3.2.3.2. Model Eğitim

Klasik Makine Öğrenmesi öğreticili sınıflandırma kapsamına giren MATLAB "ClassificationLearner" uygulamasında tanımlı 33 farklı algoritmanın eğitimi sonucunda modellerin eğitim doğruluk oranına göre sıralaması Şekil 11'de verilmiştir. "Fine KNN" en yüksek doğruluk oranına (%98.4) sahip model çıkmıştır.



Şekil 11. Eğitim tahmin doğruluk oranına göre model sıralamasını gösteren MATLAB ekran görüntüsü

3.2.3.3. Model Doğrulama (Validasyon)

Modellerin eğitimi sonrası MATLAB "ClassificationLearner" uygulamasına yüklenen validasyon verisiyle yapılan doğrulama işlemi sonucunda, "Bilayered NN" en yüksek doğruluk oranına (%95.4) sahip model çıkmıştır.

3.2.3.4. Model Test

Modellerin doğrulaması sonrası "ClassificationLearner" uygulamasına yüklenen işlenmemiş test verisiyle yapılan test işlemi sonucunda, "Coarse KNN" en yüksek doğruluk oranına (%98.7) sahip model çıkmıştır.

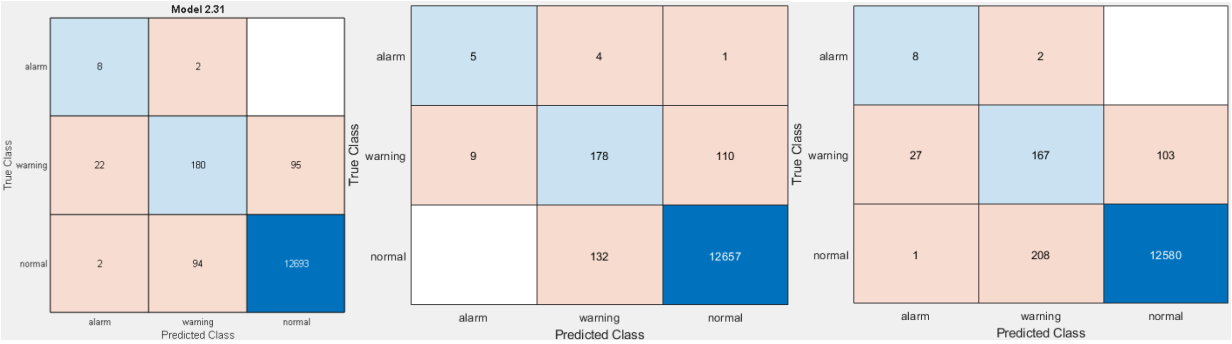
İdealde, test verisindeki dağılımın eğitim verisindeki dağılımdan farklı olmaması için, eğitim ve test verisine aynı ön-işleme adımlarının uygulanması gerekmektedir, ancak bu bir zorunluluk değildir. Çünkü, eğitim verisindeki gürültüyü azaltmak ve örüntüleri modelin öğrenmesi için daha anlaşılır hale getirerek dayanıklılığı artırmak için yapılan "smoothing" işleminin test verisine de uygulanması halinde, bazı test noktaları, özellikle arıza yaklaşımını gösteren keskin değişimler, bulanıklaşabilir veya kayabilir veya sınıflandırmaya yardımcı önemli tepe/çukur bilgileri kaybolabilir. Sonuç olarak model bazı test örneklerini doğru şekilde tahmin edemeyebilir. Bu durumda, genel tahmin doğruluk oranı yükselirken "alarm" kategorik verisinin tespiti zayıflar. Bu nedenle [4,0] filtresi yalnızca eğitim verisine uygulanmış olup, test verisi ham bırakılmıştır.

3.2.3.5. Model Değerlendirme

Özellikle "alarm" kategorisinin bakım kararlarında en kritik sınıf olmasına istinaden, tüm kategorilerin tahmin doğruluk oranı yerine, test sonucunda hata matrisine göre alarm kategorisinin F1 skoru ile alarma giren motorların tahmin doğruluğu değerlendirme kriteri olarak seçilmiştir. Doğrulama verisi ile test verisi özelliklerinin aynı olması halinde, doğrulama sonucunda elde edilen alarm kategorisinin F1 skorunun da model değerlendirilmesinde dikkate alınabileceği değerlendirilmektedir.

"ClassificationLearner" uygulamasında tahmin edilen alarm durumlarının hangi motora ait olduğunun gösterilmemesi nedeniyle, eğitim sonunda seçilen modelin "generate function" butonuyla üretilen fonksiyon kodları kullanılarak alarm tahmini yapılan motor no.ları belirlenebilmiştir.

Bazı modellerin, özellikle ANN esaslı algoritmaların, değerlendirmeye esas test hata matrisine bakılırken, "ClassificationLearner" uygulamasından ve MATLAB fonksiyon kodları kullanılarak elde edilen arasında farklılık olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, Şekil 12'de görüldüğü üzere, "Trilayered Neural Network" algoritmasının aynı data ile yapılan her eğitim ve test işlemi sonucunun farklı çıktığı, eğitim doğruluk oranının %95.01 ile %95.29 arasında değişkenlik gösterirken, farklı test hata matrislerine bağlı olarak F1 skorlarının da değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 12. "Trilayered Neural Network" modeli test hata matrisleri kıyaslama

Anılan modelin tahmin edilen "alarm" kategorisindeki motor sayısının da Şekil 13'te sunulduğu üzere 7 ile 12 arasında değişebildiği, bu nedenle kararsız bir model özelliği sergilediği görülmüştür.

9×4 table

Engine_ID	Time	Predicted_RUL
34	203	6
81	213	6
35	198	7
76	205	8
20	183	9
31	192	9
66	144	9
68	186	9
82	162	9

7×4 table

Engine_ID	Time	Predicted_RUL
34	203	7
81	213	7
31	193	8
35	198	8
76	205	8
68	174	9
82	162	9

12×4 table

Engine_ID	Time	Predicted_RUL
81	213	2
34	203	4
31	196	6
35	198	6
76	205	6
20	183	8
68	186	8
82	162	8
49	303	9
56	114	9
66	144	9
92	149	9

Şekil 13. "Trilayered Neural Network" modelinin farklı RUL tahminlerini gösteren MATLAB ekranları

Bunun sebepleri, her ANN eğitiminde sabit bir rastgelelik tohumu (rng default) tanımlanmadığı sürece MATLAB'in başlangıç ağırlıklarını rastlantısal olarak ataması ve eğitim verisine "smoothing" işlemi uygulanmış olmasına karşın test verilerinin ham bırakılmasıdır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Klasik makine öğrenmesi metotları arasında yer alan öğreticili sınıflandırma (üç kategorili) yöntemi ile 100 adet uçak motorunun kestirimci bakım planlamasına esas RUL tahmin modeli geliştirilmesi çalışmasına yönelik aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

Eğitim verisine "smoothing" işlemi uygulanması modelin daha iyi genelleşmesine yardımcı olurken, ham test verisi gerçek hayattaki sensör dalgalanmalarını koruduğundan, model daha gerçekçi koşullarda değerlendirilmiştir. Ancak, bu durum, modelin öğrendiği dağılım ile test verisinin dağılımı arasında belirgin

bir dağılım uyumsuzluğu (distribution mismatch) oluşturmakta; dolayısıyla özellikle ANN esaslı modeller, düzleştirilmiş (smoothed) örüntülere göre eğitildiği için ham sinyalleri sınıflandırmada aşırı duyarlı ve kararsız hale gelmektedir. Öte yandan eğitim ve test verisi arasında aynı ön-işleme adımlarını uygulamamaktan kaynaklanan hafif uyumsuzluğun ise fazladan yanlış alarm üretmiş olabileceği, ancak bu durumun havacılıkta güvenlik açısından daha iyi olduğu, çünkü bu durumun gerçek bir arızanın gözden kaçırılmasından daha az riskli olduğu değerlendirilmiştir.

Kestirimci bakımda gerçek bir "alarm" kategorisinin tahmin edilememesinin maliyeti, yanlış bir alarm tahmininde bulunulmasının maliyetinden genellikle çok daha yüksektir. Bu nedenle, yanlış alarmlar tahmin edilse bile, bakıma alınması gereken hiçbir motorun gözden kaçırılmaması için test verisinde mevcut 5 motora ait toplam 10 alarm kategorik verisinin maksimum sayıda veya en azından 5 motorun hepsini kapsayacak şekilde tahmin edilmesi esastır.

Geliştirilen 33 farklı modelin testi sonucunda alarm kategorisinin F1 skoru ile alarma giren motorların tahmin doğruluğu kriterine göre değerlendirilen modellerin performans sıralaması Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Geliştirilen RUL Tahmin Modelleri Değerlendirme Tablosu

Model Adı	**Eğitim**	**Validasyon**		**Test**		
	Doğruluk Oranı	Doğruluk Oranı	Alarm F1 Skoru	Doğruluk Oranı	Alarm F1 Skoru	Alarm Motorları Tahmini
Trilayered Neural Network	%95.2	%94.6	0.829	%98.4	0.417	34(7)-81(7)-31(8)-35(8)-76(8)-68(9)-82(9)
Weighted KNN	%97.6	%93.7	0.778	%98.5	**0.452**	81(5)-31(6)-34(7)-68(7)-35(8)-82(8)-20(9)-76(9)
Bilayered Neural Network	%95.1	**%95.4**	0.856	%98.4	0.444	34(6)-81(6)-35(8)-68(8)-76(8)-20(9)-31(9)-82(9)
Medium KNN	%96.5	%94.3	0.798	%98.4	0.437	31(5)-81(5)-34(7)-68(7)-35(8)-82(8)-20(9)-76(9)
Linear SVM	%94.9	%94.9	0.844	%98.4	0.429	34(6)-81(6)-35(8)-68(8)-76(8)-82(8) 20(9)-31(9)
Narrow Neural Network	%94.9	%95	**0.861**	%98.3	0.414	34(6)-81(6)-35(7)-68(8)-76(8)-82(8) 20(9)-31(9)

Medium Gaussian SVM	%95.3	%95	0.838	%98.6	0.375	81(4)-34(7)-68(7)-76(7)-31(8)-35(8)-82(8)-20(9)
Coarse KNN	%95	%95.3	0.857	**%98.7**	0.429	34(6)-81(6)-31(8)-35(8)-68(8)-20(9)-56(9)-76(9)-82(9)
Coarse Gaussian SVM	%95.1	%94.8	0.818	**%98.7**	0.429	81(6)-34(7)-31(8)-35(8)-68(8)-76(8)-20(9)-49(9)- 82(9)
Ensemble RUSBoosted Trees	%92.2	%92.9	0.825	%97.1	0.324	81(5)-34(6)-35(6)-31(7)-76(7)-56(8)-68(8)-82(8)-20(9)-36(9)
Fine KNN	**%98.4**	%92.9	0.776	%97.8	0.318	31(4)-68(5)-81(5)-35(6)-56(7)-20(8)-34(8)-76(8)-82(8)-36(9)-42(9)-49(9)

Tabloda verilen tüm modellerin gerçekten alarma giren 31, 34, 68, 81 ve 82 nu.lı motorların hepsini tahmin edebildiği, eğitim, validasyon veya test sonucunda elde edilen en yüksek sınıflandırma doğruluk oranına sahip modellerin (sırasıyla Fine KNN, Bilayered Neural Network, Coarse KNN ve Coarse Gaussian SVM) ise performansı en yüksek modeller olmadığı görülmektedir.

Tabloya göre, "alarm" kategorisine giren motorları tahmin açısından en iyi model "Trilayered Neural Network"olarak görülürken, "alarm" kategorisi için en yüksek F1 skoruna sahip model ise "Weighted KNN"dir. "Trilayered Neural Network" modelinin eğitim ve test verisi arasındaki uyumsuzluk kaynaklı aşırı kararsız model özelliğini gösterdiği dikkate alındığında, en iyi performans gösteren algoritmanın "Weighted KNN" olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çünkü, ANN esaslı modelleri kararsızlık gerekçesiyle değerlendirme dışı bıraktığımızda, sadece 3 adet aynı motoru yanlış tahmin yapan en iyi 4 model arasında "Weighted KNN" modeli, tahmin edilen RUL değerlerine göre daha doğru bakım ihtiyaç sıralaması yaptığından en iyi modeldir. Ayrıca, mesafe tabanlı bir yöntem olması nedeniyle daha kararlı RUL tahmini (Test sonucu değişmiyor.) yapmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, MATLAB ortamında, 100 farklı uçak motoruna ait C-MAPSS simülasyon verisinin kullanılması suretiyle sadece klasik öğreticili öğrenme-sınıflandırma algoritmaları kullanılarak RUL tahmini yapan 33 farklı kestirimci bakım modeli geliştirilmiştir. Literatürde yaygın olarak kullanılan ikili sınıflandırma yaklaşımlarının aksine (Azyus & Wijaya, 2022; Güler, 2024; Kumar & Mokashi, 2021), motorlar alarm durumuna geçmeden önce RUL takibinin kullanıcı tarafından daha etkin yapılabilmesi amacıyla üç sınıflı bir sınıflandırma yapısı tercih edilmiştir. Ayrıca, kestirimci bakımda gerçek bir "alarm" kategorisinin tahmin edilememesinin maliyetinin, yanlış bir alarm tahmininde bulunulmasının maliyetinden genellikle çok daha yüksek olmasına istinaden bakıma alınması gereken hiçbir motorun gözden kaçırılmaması maksadıyla, tüm kategorilerin toplam tahmin doğruluk oranı yerine, sadece alarm

kategorisinin F1 skoru ile alarma giren motorların tahmin doğruluğunun performans değerlendirme kriteri olarak dikkate alınmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda, en kararlı ve alarm F1 skoru en yüksek "Weighted KNN" modelinin yaptığı tahmine göre, 100 adet motordan arıza yapmasına 10 sorti kalan "alarm" durumundaki 8 motorun (20, 31, 34, 35, 68, 76, 81 ve 82 nu.lı motorlar) takılı olduğu uçakların, acilen imkan ve yetki sahibi bir bakım (Maintenance, Repair and Overhaul-MRO) tesisinde motor değişim bakımına alınması gerekmektedir. Burada zamanından önce bakıma girecek motorlar 20 (RUL=16), 35 (RUL=11) ve 76 (RUL=10) nu.lı motorlar olup, RUL değerlerinin yine düşük oldukları göz önünde bulundurulduğunda model performansının iyi seviyede olduğu söylenebilir.

Konuya ilişkin gelecekte yapılabilecek çalışmalar olarak; bakım kararlarında en kritik sınıf olan ve özellikle tahmin edilmesi beklenen "alarm" kategorisi sayısının diğer kategorilere kıyasla az olması nedeniyle, mevcut veri dengesizliği (data imbalance) probleminin çözümüne yönelik "cost function" uygulanması gibi tedbirlerin alınmasında fayda mütalaa edilmektedir. Ayrıca, tahmin modelini daha gürbüz ve kararlı hale getirmek maksadıyla veri çoğaltma (data augmentation) ve model hiperparametrelerinin optimizasyonu işlemlerinin uygulanması uygun olacaktır. İlave olarak, modelin tahmin kararının gerekçesi olan açıklanabilirlik özelliklerinin de çalışmaya dahil edilmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

Achouch, M., Dimitrova, M., Ziane, K., Karganroudi, S.S., Dhouib, R., Ibrahim, H., & Adda, M. (2022). On predictive maintenance in Industry 4.0: Overview, models, and challenges. *Applied Sciences*, 12, 1–22. https://doi.org/10.3390/app12168081.

Azyus, A.F., & Wijaya, S.K. (2022). Determining the method of predictive maintenance for aircraft engine using machine learning. *Journal of Computer Science and Technology*, 1–6. https://doi.org/10.32996/jcsts.

Bozkurt, S.N. (2024). *Makine öğrenmesi ile turbofan motorların geriye kalan yararlı ömrünün tahminlemesi* [Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. (866166).

Güler, O. (2024). Comparison of machine learning algorithms performance in predictive maintenance of turbofan engines. *NOHU Journal of Engineering Sciences*, 13(1), 99–106.

Kumar, V., & Mokashi, M. (2021). Predicting aircraft equipment failure using machine learning classification algorithms. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 8(11), 974–981.

Lærum, K.H. (2018). *A study of machine learning for predictive maintenance* (Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology).

Mathew, V., Toby, T., Singh, V., Rao, B. M., & Kumar, M. G. (2017). Prediction of remaining useful lifetime (RUL) of turbofan engine using machine learning. In *2017 IEEE International Conference on Circuits and Systems (ICCS)* (pp. 306–311). https://doi.org/10.1109/ICCS1.2017.8326010.

MathWorks. (2025). *What is predictive maintenance?* https://www.mathworks.com/discovery/predictive-maintenance.html.

Muştu, M. (2018). *Havacılıkta bakım güvenilirliği–örnek bir uygulama* [Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. (494799).

Saxena, A., Goebel, K., Simon, D., & Eklund, N. (2008). Damage propagation modeling for aircraft engine run-to-failure simulation. In *Proceedings of the 1st International Conference on Prognostics and Health Management (PHM08)*, Denver, CO.

Shah, D. (2014). Millions of data points flying in tight formation. 16 Mayıs 2025 tarihinde https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/news/millions-of-data-points-flying-part2-121914/ adresinden alındı.

Singh, D., Kumar, M., Arya, K. V., & Kumar, S. (2020). Aircraft engine reliability analysis using machine learning algorithms. In *2020 IEEE 15th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*. https://doi.org/10.1109/ICIIS51140.2020.9342675.

Stanton, I., Munir, K., Ikram, A., & El-Bakry, M. (2023). Predictive maintenance analytics and implementation for aircraft: Challenges and opportunities. *Systems Engineering*, 26(2), 216–237. https://doi.org/10.1002/sys.21651.

Usta, A. E. (2022). *Havacılık sektöründe uçuş verileri kullanılarak kestirimci bakım yapılması* [Yüksek lisans proje çalışması, İstanbul Teknik Üniversitesi].

RENKLİ GÖRÜNTÜLERDE ÜÇGEN MATRİS TABANLI STEGANOGRAFİ

NİLHAN SAYIN YANILMAZ
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Matematik
nilhanyanilmaz@outlook.com, ORCID: 0000-0001-8082-7830

Doç. Dr. HÜLYA KODAL SEVİNDİR
Kocaeli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik
hkodal@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1460-0608

Özet

Son birkaç on yılda dijital iletişim, sağlık kurumları, bankacılık sektörü, bilgi teknolojileri işletmeleri ve çeşitli endüstriyel alanlar başta olmak üzere birçok sektörde kritik bir işlev üstlenmiştir. Günümüzde tüm veri akışının büyük ölçüde internet üzerinden gerçekleşmesi, bilgilerin kaynaktan hedefe güvenli bir biçimde aktarılmasını zorunlu kılmaktadır. Güvenli olmayan ve açık ağ ortamlarında veri bütünlüğünü ve gizliliğini sağlamak amacıyla yaygın olarak kriptografi ve steganografi tekniklerinden yararlanılmaktadır.

Bu çalışmada gizli veri ve kapak görüntüleri renkli görüntüler olup, kare olacak şekilde boyutlanmıştır. Kare boyutlarda seçilen gizli veri, R-G-B katmanlarına ayrıldıktan sonra üçgen matrisler yöntemi kullanılarak alt üçgen matris, üst üçgen matris ve köşegen matris olarak üç paya ayrılmaktadır. Elde edilen paylar Ayrık Dalgacık Dönüşümü kullanılarak kapak görüntülerin detay katsayılarına gömülmektedir. Gömülü kapak görüntülerden elde edilen paylar birleştirilerek sır görüntüsü tekrar elde edilmektedir. Elde edilen görüntü ile sır görüntüsü arasında Tepe Sinyal Gürültü Oranı (PSNR) ve Yapı Benzerlik İndeksi Yöntemi (SSIM) değerlerine bakılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Steganografi, dalgacık dönüşümü, renkli görüntü.

TRIANGULAR MATRIX-BASED STEGANOGRAPHY IN COLOR IMAGES

Abstract

Over the past few decades, digital communication has played a critical role in many sectors, particularly healthcare institutions, the banking sector, information technology enterprises, and various industrial fields. Today, the fact that virtually all data flow occurs over the internet necessitates the secure transfer of information from source to destination. Cryptography and steganography techniques are widely used to ensure data integrity and confidentiality in insecure and open network environments.

In this study, the secret data and cover images are color images sized square. After being separated into RGB layers, the secret data, selected in square dimensions, is divided into three fractions: lower triangular matrix, upper triangular matrix, and diagonal matrix using the triangular matrix method. The resulting fractions are embedded into the detail coefficients of the cover images using the Discrete Wavelet Transform. The secret image is reconstructed by combining the fractions obtained from the embedded cover images. Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) and Structure Similarity Index Method (SSIM) values were examined between the resulting image and the cover image.

Keywords: steganography, wavelet transform, color image.

1. GİRİŞ

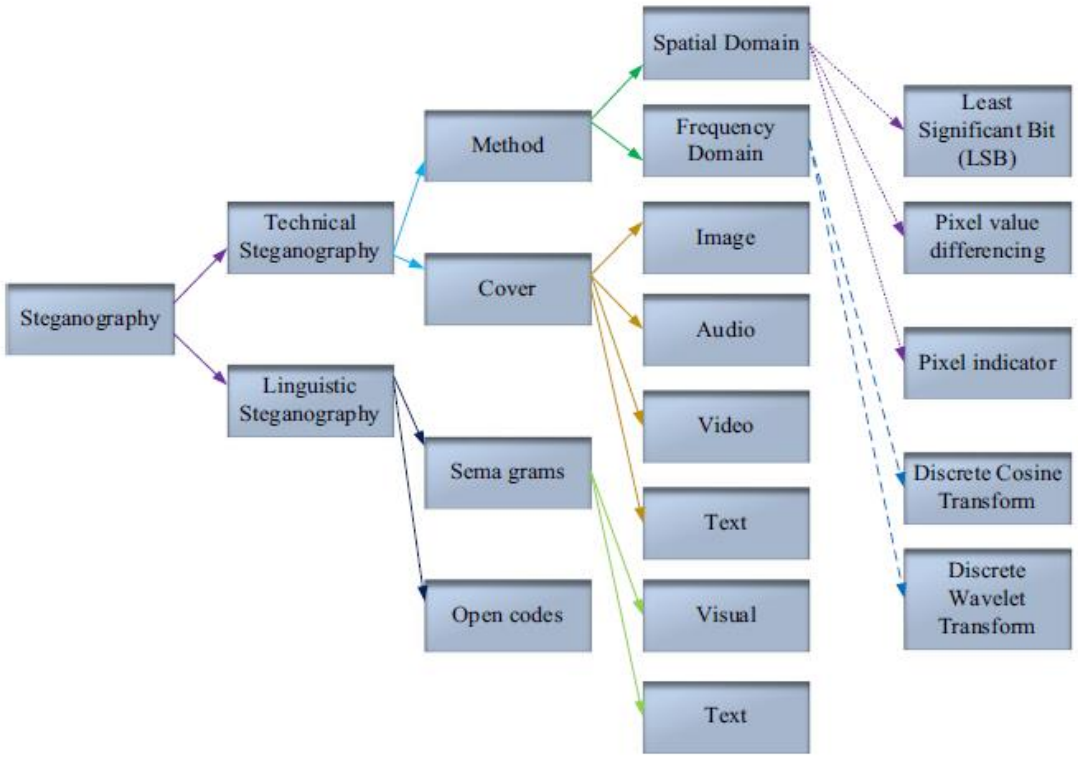
Günümüzde internet, küresel ölçekte iletilen görüntü, metin, ses ve video gibi çok çeşitli veri türlerini tek bir iletişim ortamında bütünleştirmektedir. Ancak dijital iletişim altyapısının gelişmesine rağmen, iletim kanallarının güvenli olmaması durumunda verilerin yetkisiz kişiler—özellikle bilgisayar korsanları veya diğer zararlı aktörler—tarafından ele geçirilmesi önemli bir risk oluşturmaktadır. Bu tür tehditler, güvenli veri aktarımını engellemekte ve iletilen bilginin bütünlüğünü tehlikeye atmaktadır.

Mesajların çeşitli saldırılar sonucunda bozulmasını veya kaybolmasını önlemek amacıyla, veri iletimi sırasında bilgileri korumaya yönelik çeşitli veri gizleme teknikleri kullanılmaktadır. Uygulanan yöntemin niteliğine göre veriler ya okunamaz hale gelecek biçimde dönüştürülmekte ya da farklı bir taşıyıcı ortam içine gizlenmektedir. Gizli verinin güvenli biçimde aktarılması, modern iletişim sistemleri açısından kritik bir gereklilik haline geldiğinden, bu amaçla çok sayıda gelişmiş veri gizleme yaklaşımı geliştirilmektedir.

Gömme temelli yöntemler, dijital görüntüler, ses dosyaları, videolar ve çeşitli bilgisayar tabanlı veri türleri üzerinde gerçekleştirilen işlemlere dayanmaktadır. Bu süreçte elde edilen stego görüntüsü, kapak (cover) görüntüsü içerisine gizli bilginin belirli bir gömme algoritması aracılığıyla entegre edilmesi sonucunda oluşturulan yeni bir görüntüdür. Gömülü içerik; şifreli metin, sade metin, görüntü veya diğer veri türlerinden herhangi biri olabilir.

Bu teknikler, gizli bilginin tespit edilmesini güçleştirecek biçimde yüksek gizleme kapasitesi sunmayı amaçlar. Veri doğrulama, gizlilik sağlama ve bütünlüğün korunması gibi güvenlik hedefleri doğrultusunda, veri şifreleme ve steganografik gömme işlemleri önemli uygulama alanları olarak öne çıkmaktadır.

Şekil 1, çeşitli steganografi türlerini göstermektedir.



Şekil 1. Stegonografi çeşitleri

2. MATERYAL VE METOD

Sır görüntüsü olarak seçilen görüntü, Şekil 2'de gösterilen "barbara" görüntüsüdür. Seçilen görüntü RGB formatında olup, 720 x 576 piksel boyutlarında ve 24 bit derinliğindedir. Kapak görüntülerinin tamamı RGB formatında, 512 x 512 piksel boyutlarında ve 24 bit derinliğindedir. Kullanılan yöntemde kapak görüntülerinin ve sır görüntüsünün kare matris olması gerekmektedir. Kapak görüntülerinin tamamı kare boyutlarda olduğu için değişiklik yapılmadan kullanılabilmekte ancak sır görüntüsünün kare boyutlara dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm sonucunda kullanılan tüm görüntüler 512 x 512 piksel boyutlarında olacaktır.



Şekil 2. Sır Görüntüsü

Bu çalışmanın uygulama aşamasında MATLAB (R2018b) yazılımı tercih edilmiştir. Önerilen yöntemin hem uygulanması hem de geliştirilmesi sürecinde kullanılan görsel veriler üzerinde gerçekleştirilecek ayrıştırma işlemleri ile Dalgacık Dönüşümü tabanlı gömme adımları, MATLAB'ın sunduğu fonksiyonlar ve kullanıcı tanımlı kodlar aracılığıyla uygulanmıştır. Böylece yöntemin tüm aşamaları, MATLAB ortamında oluşturulan uygun algoritmalarla sistematik bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

2.1. Üçgen Matrisler

Doğrusal cebir, matematiğin; vektörleri, vektör uzaylarını, doğrusal dönüşümleri, doğrusal denklem sistemlerini ve matris yapılarını inceleyen temel disiplinlerinden biridir. Vektör uzaylarının çağdaş matematikte merkezi bir konumda bulunması nedeniyle doğrusal cebir, hem soyut cebirin hem de fonksiyonel analizin vazgeçilmez araçlarından biri hâline gelmiştir. Aynı zamanda analitik geometriyle de güçlü bir ilişkiye sahip olan doğrusal cebir, fen bilimlerinden sosyal bilimlere kadar geniş bir uygulama alanı sunmaktadır.

Modern anlamda doğrusal cebirin temelleri 19. yüzyılın ortalarına dayanmaktadır. 1843–1844 yılları bu alanın gelişiminde kritik bir dönüm noktası olarak kabul edilirken, Arthur Cayley'nin 1857 yılında vektör kavramını sistematik biçimde tanıtması bu disiplinin ilerleyişine önemli katkı sağlamıştır. Ancak doğrusal cebirin esas gelişimi ve kuramsal derinliği 20. yüzyılda ortaya çıkmıştır.

Günümüzde modern doğrusal cebir, yalnızca iki ve üç boyutlu uzaylarla sınırlı olmayıp, isteğe bağlı sonlu veya sonsuz boyutlu uzaylar üzerinde çalışılmasına olanak tanımaktadır. İki ve üç boyutlu uzaylarda elde edilen sonuçların önemli bir bölümü, n-boyutlu uzaylara da genellenebilmektedir. Her ne kadar yüksek boyutlu uzayların geometrik olarak görselleştirilmesi güç görünse de, bu tür uzaylar hem teorik bilimlerde hem de çeşitli uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Doğrusal cebirde önemli kavramlardan biri olan üçgen matris, özel bir kare matris türüdür. Bir kare matriste ana köşegenin üzerindeki ya da altındaki tüm elemanlar sıfır olduğunda bu yapı üçgen matris olarak adlandırılır. Ana köşegenin üzerindeki elemanların tamamı sıfır ise alt üçgen matris, köşegenin altındaki elemanlar sıfır ise üst üçgen matris söz konusudur. Bir matris hem üst hem de alt üçgen özelliklerini taşıyorsa köşegen matris olarak tanımlanır. Üçgen matrisler, matris denklemlerinin çözümünde sağladıkları kolaylık nedeniyle özellikle sayısal analizde geniş kullanım alanı bulmaktadır. (1) de verilen matris, üst üçgen matris veya sağ üçgen matris; (2) de verilen matris, alt üçgen matris veya sol üçgen matristir.

$$U = \begin{bmatrix} u_{1,1} & u_{1,2} & u_{1,3} & \cdots & u_{1,n} \\ & u_{2,2} & u_{2,3} & \cdots & u_{2,n} \\ & & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & & \ddots & u_{n-1,n} \\ 0 & & & & u_{n,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$L = \begin{bmatrix} l_{1,1} & & & & 0 \\ l_{2,1} & l_{2,2} & & & \\ l_{3,1} & l_{3,2} & \ddots & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \\ l_{n,1} & l_{n,2} & \cdots & l_{n,n-1} & l_{n,n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Doğrusal cebirde yaygın olarak kullanılan gösterimlerde, L sembolü alt üçgen matrisleri (lower triangular matrix) ifade etmek amacıyla tercih edilirken, U sembolü ise üst üçgen matrisleri (upper triangular matrix) temsil etmek için kullanılmaktadır. Üst üçgen matrisle yapılabilecek işlemler:

- İki üst üçgen matrisin toplamı, üst üçgendir.
- İki üst üçgen matrisin çarpımı, üst üçgendir.
- Terslenebilir üst üçgen matrisin tersi, üst üçgendir.
- Üst üçgen matrisin bir sabitle çarpımı üst üçgen matristir.

2.2 Ayrık Dalgacık Dönüşümü

Ayrık dalgacık dönüşümü, denklem 1'de formüle edilen dalgacık dönüşümünün bir uygulamasıdır. ω sürekli bir fonksiyondur, j bir ölçekleyicidir ve k kayan bir parametredir. ω'yi temsil eden denklem aşağıdaki şekildedir:

$$\omega_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}}\omega(2^{-j}t - k) \quad (1)$$

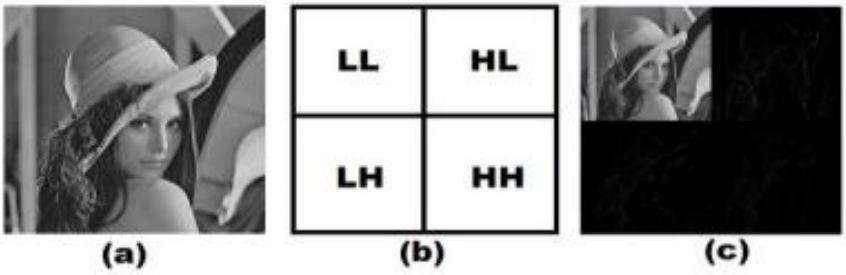
Dalgacık serisi genişlemesi, sürekli bir değişkenin fonksiyonunu bir katsayı serisine eşler. Genişletilmiş fonksiyon ayrıksa, ortaya çıkan katsayılara ayrık dalgacık dönüşümü denir. Üç ayrık dalgacık dönüşümü vardır (1-D DWT, 2-D DWT ve 3-D DWT), ilki tek boyutlu ayrık dalgacık dönüşümüdür. 1-D DWT, ölçekleme ve dalgacık fonksiyonlarının çoklu çözünürlüklü formülasyonları Denklemler 2 ve 3'te verilmiştir.

$$\theta_{j,m,n}(x,y) = 2^{\frac{j}{2}}\theta\left(2^j x - m, 2^j y - n\right) \quad (2)$$

$$\vartheta^i_{j,m,n}(x,y) = 2^{\frac{j}{2}}\vartheta^i\left(2^j x - m, 2^j y - n\right) \quad (3)$$

Burada i = yönlü dalgacıklar, j = keyfi başlangıç ölçeği, m ve n ölçekleme fonksiyonunun konumunu belirler.

Ayrık dalgacık dönüşümü, görüntü piksellerini dalgacıklara dönüştürmek için kullanılır. Bu teknik kullanılarak elde edilen frekans tabanlı görüntülere çeşitli kodlamalar uygulanır. Çok seviyeli dalgacık ayrıştırması, orijinal seçili görüntüye uygulanır Şekil 3 (a). Şekil 3 (b)'nin 1-D DWT tek seviyeli ayrıştırmasının orijinal görüntüye uygulanması, Şekil 3 (c)'de gösterilen sonucu üretecektir.



Şekil 3. Çok Seviyeli Dalgacık Ayrıştırması.

Ayrık dalgacık dönüşümlerinin diğer dönüşüm yöntemlerine göre avantajı, frekans ve konum bilgilerinin tutulmasıdır. DWT algoritması bunu başarır; DWT algoritması dönüşümü gerçekleştirebilmek için matris biçimindeki verilere ihtiyaç duyar.

Frekans pozisyonunun korunması sonucunda, sinyal gürültü giderme, veri sıkıştırma ve 2 boyutlu DWT gibi farklı DWT türlerinin kodlamaları gerçekleştirilebildi.

Denklem 4, Haar dalgacıklarıyla ilişkili Haar matrisinin 2 boyutlu fonksiyonunu gösterir.

$$H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \qquad (4)$$

Bu durumda, dönüşüm her 2x2 matrise uygulanır. 1-D dönüşümü her satıra uygulandığında, bu dönüşümün sonucu DHWT'yi elde etmek için her sütunu dönüştürmek için bir girdi olarak kullanılır. 2x2 matris kullanılarak yapılan 2-D dönüşümün sonuçları Denklem 5'te gösterilmiştir.

$$DHWT\,(X) \;=\; DHWT \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} a+b+c+d & a-b+c-d \\ a+b-c-d & a-b-c+d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_X^{LL} & W_X^{HL} \\ W_X^{LH} & W_X^{HH} \end{bmatrix} \qquad (5)$$

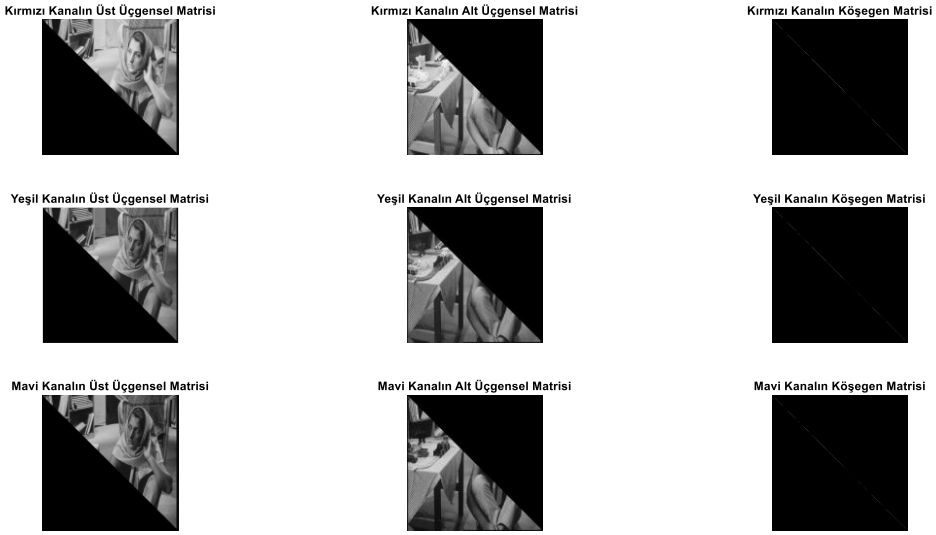
Burada $\boldsymbol{W_X^{LL}}$ yatay ve dikey alçak geçiş, $\boldsymbol{W_X^{HL}}$ yatay yüksek geçiş ve dikey alçak geçiş, $\boldsymbol{W_X^{LH}}$ yatay alçak geçiş ve dikey yüksek geçiş ve $\boldsymbol{W_X^{HH}}$ yatay ve dikey yüksek geçiş dönüşüm bileşenleridir.

2.2. Üçgen Matrisler ile Görüntü İşleme

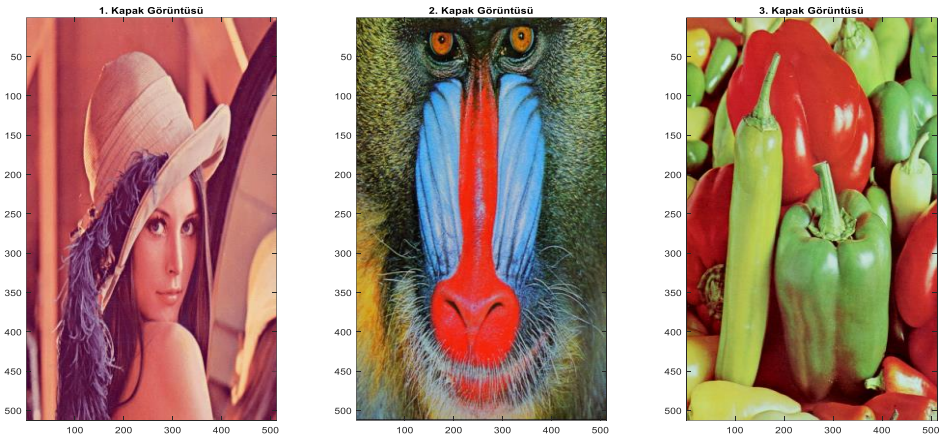
Sır görüntüsü olarak kullandığımız test resimlerinden “barbara.bmp” dosyasının boyutları 720 x 576 pikseldir. Kullanacağımız yöntemde üçgen matrisler sadece kare matrislere uygulanabileceği için yeniden boyutlandırma yapılması gerekmektedir. Görüntüler için standart piksel boyutlarından 512 x 512 piksel boyutu seçilmiştir ve sır görüntüsü ve kapak görüntülerinin tamamı bu boyuta dönüştürülmüştür. Şekil 2’de 512 x 512 piksel boyutunda sır görüntüsü verilmiştir. Şekil 4’de bu sır görüntüsünün her biri yine 512 x 512 piksel boyutlarında olan kırmızı, yeşil ve mavi katmanlarına ayrılmış hali verilmiştir. Şekil 5’ te katmanların üçgen ve köşegen matris formları verilmiştir. Şekil 6’da 512 x 512 piksel boyutlarında kapak görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4. Sır görüntüsünün kırmızı-yeşil-mavi katmanları

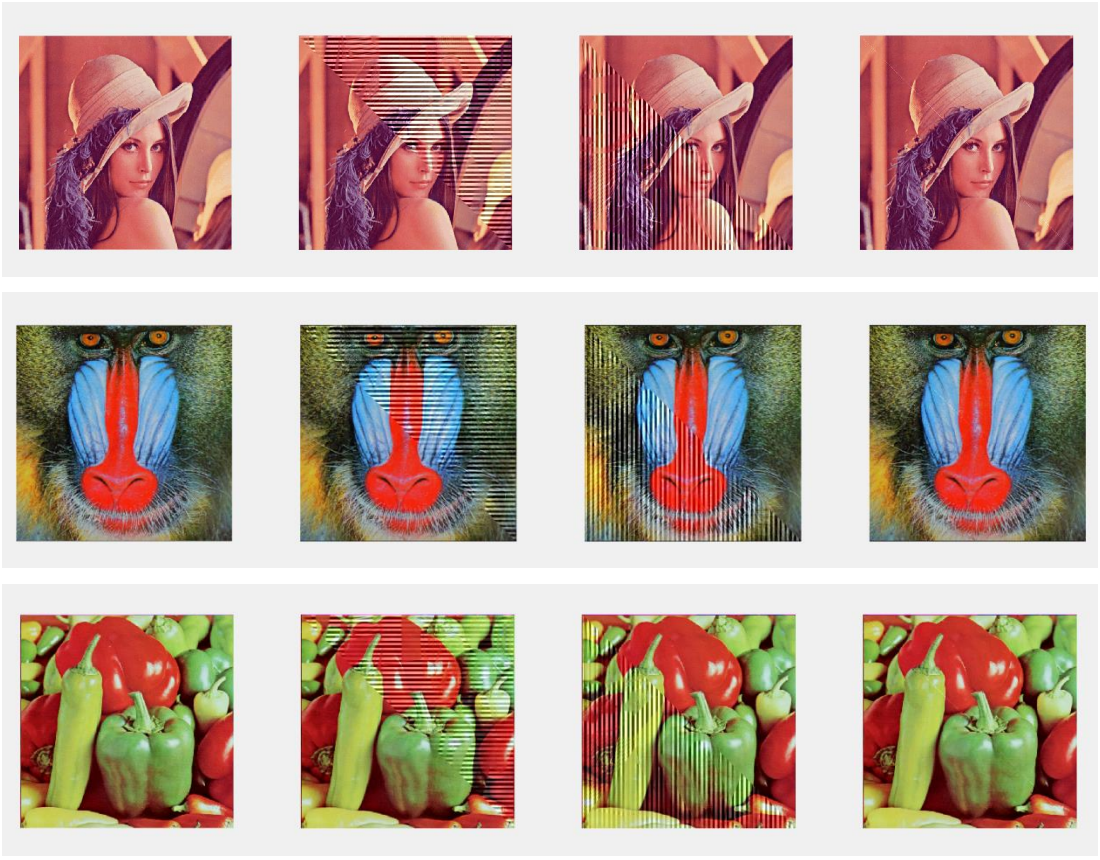


Şekil 5. Katmanların alt üçgen, üst üçgen ve köşegen matris formu



Şekil 6. Kapak görüntüleri

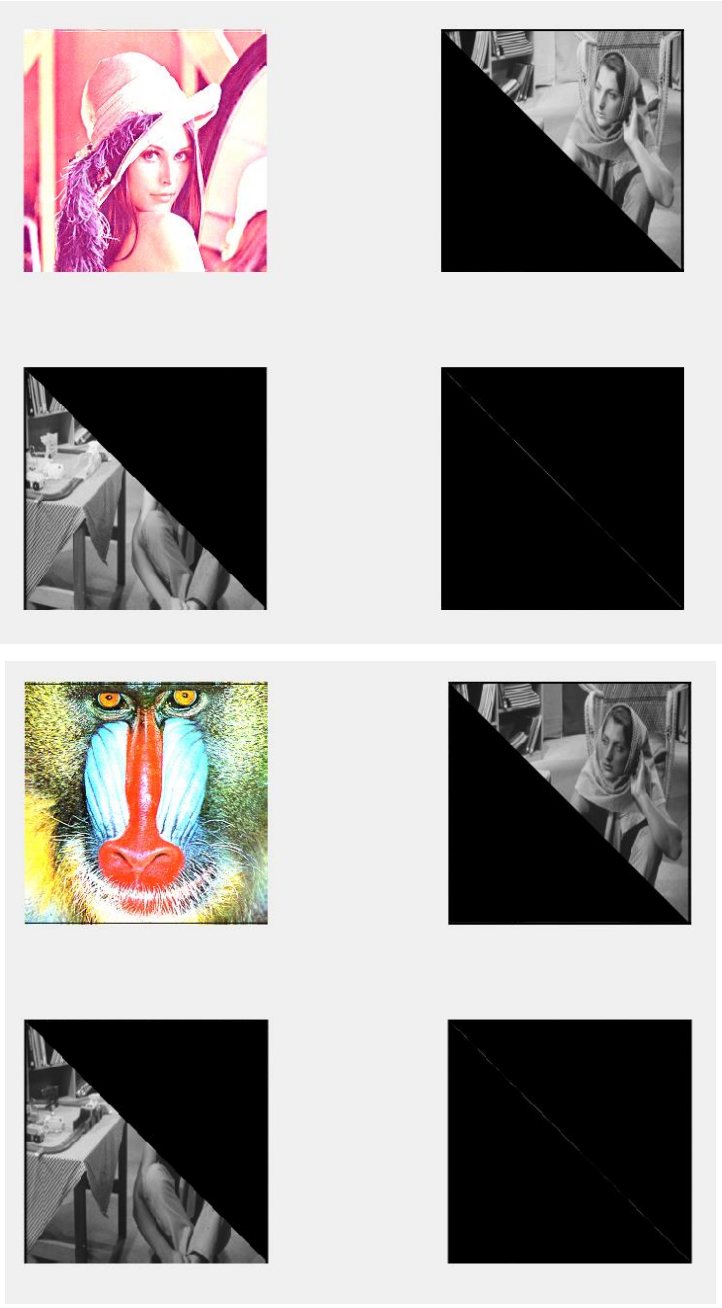
Şekil 5'te verilen kapak görüntülerinden her birine ayrık dalgacık dönüşümü uygulanmıştır ve elde edilen katsayılardan yatay, dikey ve köşegen katsayılarına, sır görüntüsünün katmanlarının alt üçgen, üst üçgen ve köşegen matris elemanları gömülmüştür. Elde edilen sır payları Şekil 7'de gösterilmiştir.

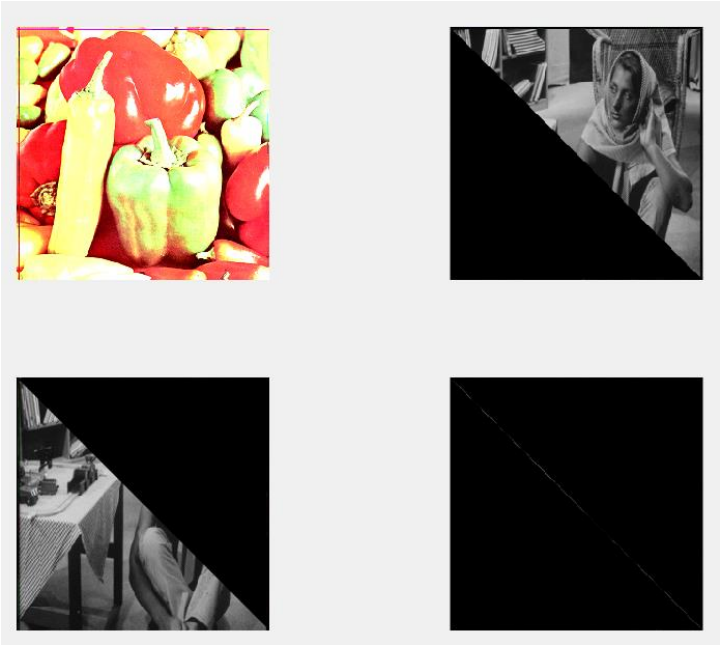


Şekil 7. Sır görüntüsünün kanallarının üst üçgen, alt üçgen ve köşegen matrislerinin kapak görüntülerinin detaylarına gömülmesi

Elde edilen kapak görüntülere Ters Dalgacık Dönüşümü uygulanarak sır görüntüsünün katmanlarının matrisleri elde edilmiştir. MATLAB paket programında uygun kodlar yazılarak kapak görüntülerin yatay, dikey ve köşegen katsayılarına gömülen her bir katmanın alt üçgen matrisi, üst üçgen matrisi ve köşegen matrisi, bu katsayılardan çıkarılıp bir araya getirilerek sır görüntüsü tekrar elde edilmeye çalışılmıştır.

Yatay, dikey ve köşegen katsayılarına gömülen her bir katmanın alt üçgen, üst üçgen ve köşegen matrislerinin bu katsayılardan çıkarılmış hali Şekil 8'de verilmiştir.





Şekil 8. Katmanların alt üçgen, üst üçgen ve köşegen matrislerinin bu katsayılardan çıkarılmış hali

Katsayılardan çıkarılan katmanların matris parçaları öncelikle katman katman kendi arasında birleştirilmiştir. Elde edilen katmanlar birleştirilerek Şekil 9'daki görüntü elde edilmiştir.



Şekil 9. Elde edilen sır görüntüsü

3. SONUÇLAR

Uygulama geliştirilirken kullanılan program 2018 yılında yayımlanan MATLAB (R2018b) paket programıdır.

Görüntülere veri gömme aşamasında kullanılacak olan dönüşüm Dalgacık Dönüşümüdür. İki boyutlu (2B) dalgacık dönüşümleri, bir boyutlu (1B) dalgacık dönüşümlerinde uygulanan yöntemin satır ve sütun olarak genişletilmiş bir uygulamasıdır. Yöntemin uygulanması ve geliştirilmesi aşamasında kullanılan görsel verilere uygulanacak ayrışma ve Dalgacık Dönüşümü ile gömme işlemlerinin MATLAB paket programında

uygun kodlar yazılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrık Dalgacık Dönüşümü, görüntüyü dört alt banda bölen ve gömmenin bağımsız olarak yapılabildiği ve stego görüntülere yüksek görsel kalite sağlayan bir dönüşümdür. Dönüşüm alanında, doğrudan yoğunluk değerleri yerine dönüştürülmüş katsayılarda gömme yapılır. Böylelikle kapak görüntülerin yapısı bozulmamış olmakla birlikte insan görme sistemi ile algılanamamaktadır.

Sır görüntüsü kırmızı-yeşil ve mavi katmanlarına ayrılarak her bandına alt üçgen, üst üçgen ve köşegen matris dönüşümü yapılmıştır. Elde edilen matrislerden her biri bir kapak görüntüsünün yatay, dikey ve köşegen katsayılarına gömülmüştür. Kullanılan matris parçalarını gömme ve çıkarma işlemi sonucunda birleştirilerek PSNR değerine bakılmıştır ve sır görüntüsü ile elde edilen görüntü arasında oluşan değişim gözlenmiştir.

4. TARTIŞMA

Sır görüntüsünün kırmızı-yeşil ve mavi katmanlarına ayrılarak her bandına alt üçgen, üst üçgen ve köşegen matrislerinin gömüldüğü kapak görüntülerinde meydana gelen değişiklikler sır görüntüsü hakkında bilgi vermemektedir. Fark edilmesi durumunda tek başına bir anlam ifade etmeyecek ancak her katman için alt üçgen, üst üçgen ve köşegen matrislerinin bir araya getirildikten sonra üç katmanın birleştirilmesiyle asıl sır görüntüsü ortaya çıkacaktır. Elde edilen sır görüntüsü ile asıl sır görüntüsü arasında insan gözüyle fark edilecek büyük değişiklik olmamaktadır. İki görüntü arasında Tepe Sinyal Gürültü Oranı (PSNR) ve Yapı Benzerlik İndeksi Yöntemi (SSIM) değerlerine bakılmıştır. PSNR değeri >20 geçerli kabul edilmekte olup, uygulamamızda 24.9076 olarak elde edilmiştir. Görüntü bozulması, yapısal bilgilerdeki algı değişikliği olarak kabul edilen ve bu sebeple algıya dayalı bir yöntem olan SSIM değeri 0 ile 1 aralığında alınmaktadır. Uygulamamızda 0.9389 olarak elde edilen bu değer, sır görüntüsü ve elde edilen görüntü arasında algıya dayalı bir farkın neredeyse olmadığını göstermektedir.

KAYNAKLAR

Blesswin, J., Mary, S., Kumat, M., (2021). “Secured Communication Method Usin Visual Secret Sharing Scheme for Color Images”, *Journal of Internet Technology*, DOI: 10.53106/160792642021072204008.

Farid, H., (2009). “Image Forgery Detection”, *IEEE Signal Processing Magazine. IEEE*, DOI: 10.1109/MSP.2008.931079.

Manisha, M., Rao, G., (2021). “Colour Visual Cryptography (3,3) Scheme”, *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(2), 3189-3198.

Ng, T., Chang, S., (2004). “A Model For Image Splicing”, *2004 International Conference on Image Processing, 2004. ICIP '04,* DOI: 10.1109/ICIP.2004.1419512.

Prasad, S., Pal, A., Mukherjee, S., (2023). “An RGB Color Image Steganography Scheme By Binary Lower Triangular Matrix”, *IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems,* DOI: 10.1109/TITS.2023.3264467.

Priyadharshini, S., Sandhya, (2020). “Data Securıty For Highly Secure Messages With The Concept Of Steganography And Cryptography”, *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 11(03), 2286-2292.

Varghese, F., Sasikala, P., (2023). “A Detailed Review Based on Secure Data Transmission Using Cryptography and Steganography”, *Wireless Personal Communications (2023).* 129, 2291–2318. DOI: 10.1007/s11277-023-10183-z.

Verma, A., Gupta, A., Suman, S., Khan, M., Sarangi, P., (2021). “Encryption and Decryption of Images based on Steganography and Cryptography Algorithms: A New model”, *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(11), 2839-2846.

OTOMOTİV MONTAJ HATTINDA REBA VE JSI YÖNTEMLERİYLE ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRMESİ: UYGULAMA VE ANALİZ

MELEK DURMUŞ
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
E-Posta: melekddurmus@gmail.com

Dr. Öğr. Üyesi HATİCE ESEN
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
E-Posta: hatice.eris@kocaeli.edu.tr

Özet

Sanayileşmenin hızla ilerlediği günümüz üretim ortamlarında, insan faktörünün verimliliği ve çalışma koşullarının ergonomik açıdan uygunluğu işletmelerin sürdürülebilir performansı üzerinde kritik bir role sahiptir. Özellikle otomotiv sektörü gibi yüksek hız, düşük çevrim süresi ve tekrarlayıcı iş yükü gerektiren montaj hatlarında çalışan operatörler, çoğu zaman uygunsuz duruşlar, tekrarlayıcı el-bilek hareketleri ve ağır yük kaldırma faaliyetlerine maruz kalmaktadır. Bu durum, kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının ortaya çıkma riskini önemli ölçüde artırmaktadır. Literatürde de belirtildiği üzere, ergonomik açıdan yetersiz çalışma koşulları çalışan sağlığının yanı sıra üretim kalitesi, iş gücü kaybı ve işletme maliyetleri üzerinde doğrudan etkiler yaratmaktadır.

Bu çalışma kapsamında otomotiv montaj hattında yer alan kritik istasyonlar, ergonomik maruziyet seviyelerini belirlemek amacıyla REBA (Rapid Entire Body Assessment) ve JSI (Job Strain Index) yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. REBA yöntemi vücudun genel duruşunu ve yüklenme seviyesini değerlendirirken, JSI yöntemi özellikle el-bilek bölgesindeki mikro düzey zorlanmaları detaylı biçimde incelemektedir. Analiz sonuçları, belirli istasyonlarda yüksek risk seviyelerinin bulunduğunu ortaya koymuş ve bu alanlara yönelik düzeltici faaliyetler önerilmiştir. Elde edilen bulgular, iki yöntemin birlikte kullanılmasının ergonomik risklerin hem makro hem mikro düzeyde bütünsel olarak değerlendirilmesine olanak sağladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Ergonomi, REBA, JSI, Montaj Hattı

ERGONOMIC RISK ASSESSMENT WITH REBA AND JSI METHODS IN AUTOMOTIVE ASSEMBLY LINE: APPLICATION AND ANALYSIS

Abstract

In today’s rapidly industrializing production environments, the effectiveness of the human factor and the ergonomic suitability of working conditions play a crucial role in maintaining sustainable operational performance. Particularly in the automotive industry, where fast-paced workflows, short cycle times, and repetitive manual activities are common, assembly line operators are frequently exposed to awkward postures, repetitive hand–wrist movements, and manual handling of heavy loads. Such physical demands significantly increase the likelihood of developing musculoskeletal disorders. As highlighted in the literature, inadequate ergonomic conditions not only affect employee health but also negatively influence product quality, labor productivity, absenteeism rates, and overall operational costs.

In this study, ergonomic risks in selected automotive assembly stations were evaluated using two widely accepted assessment methods: REBA (Rapid Entire Body Assessment) and JSI (Job Strain Index). The REBA method provides a macro-level perspective by assessing whole-body posture, trunk inclination, leg position, and load handling, while the JSI method focuses on micro-level stressors such as wrist posture, force exertion, repetition, and task duration. The analysis revealed that several stations exhibited high-risk scores, indicating an urgent need for corrective measures and workstation redesign.

The findings demonstrate that using REBA and JSI together provides a more comprehensive evaluation of ergonomic exposure. While REBA effectively identifies general postural risks, JSI captures the detailed upper-limb strain that may not be visible in whole-body assessments. This integrated approach enhances the accuracy of ergonomic risk identification and supports the development of more effective improvement strategies.

Keywords: Ergonomics, REBA, JSI, assembly line

1. GİRİŞ

Otomotiv sektörü, tekrarlayıcı montaj işlemleri ve yüksek üretim temposu nedeniyle çalışanlar üzerinde önemli fiziksel yük oluşturan bir çalışma alanıdır. Bu çalışma, montaj hatlarında çalışanların duruş, kuvvet ve hareket sıklığına bağlı ergonomik risklerini REBA ve JSI yöntemleriyle değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Türkiye'de bir otomotiv yan sanayi işletmesinde dört temel istasyonda yapılan gözlemsel analizler sonucunda, hatların yüksek çevrim hızı ve manuel işlem yoğunluğu nedeniyle çalışanlarda kas-iskelet sistemi zorlanmalarının arttığı görülmüştür. EU-OSHA (2021) verileri de endüstriyel meslek hastalıklarının büyük bölümünün KİSR kaynaklı olduğunu ortaya koymaktadır.

REBA yöntemi çalışanların genel vücut duruşunu değerlendirirken, JSI yöntemi el-bilek düzeyindeki tekrarlayıcı hareket ve kuvvet gereksinimlerini analiz eder (Hignett & McAtamney, 2000; Moore & Garg, 1995). Yapılan değerlendirmeler, iki yöntemin birlikte kullanılmasının ergonomik risklerin hem makro hem de mikro düzeyde bütüncül şekilde belirlenmesine olanak sağladığını göstermiştir. Bu çalışma, otomotiv montaj hatlarında ergonomik iyileştirme faaliyetlerinin planlanması için bilimsel bir temel sunmaktadır.

2. BİLİMSEL YAZIN TARAMASI

Konuyla ilgili litaratür incelendiğinde özellikle otomotiv montaj hatlarında görülen kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının temel nedenlerinin tekrarlayıcı hareketler, uygunsuz duruşlar, elle yük kaldırma ve yetersiz iş istasyonu tasarımı olduğunu göstermektedir (Bernard, 1997; Punnett & Wegman, 2004; Waters et al., 1993; Marras, 2000).

Otomotiv sektörü, kısa çevrim süreleri, dar çalışma boşluğu, yüksek hızda üretim ve ağır komponentlerin taşındığı görevler nedeniyle KİSR açısından en riskli sektörlerden biri olarak tanımlanmaktadır (Deros et al., 2014; Habib et al., 2019; EU-OSHA, 2021). Postür ve yüklenme analizleri üzerine yapılan çalışmalar, omuz hizasında çalışma, 30–60° gövde eğilmesi, kol uzatma ve sabit duruşların kas-iskelet zorlanmasını ciddi ölçüde artırdığını; özellikle bel ve üst ekstremite bölgelerinin bu risklere daha duyarlı olduğunu göstermiştir (David, 2005; Bridger, 2009; Kroemer & Grandjean, 2009). Ergonomik risk analizinde kullanılan REBA, RULA, OWAS, Strain Index, NIOSH Lifting Equation ve QEC gibi yöntemler, farklı vücut bölgelerindeki yüklenmeleri değerlendirmek amacıyla geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılan araçlardır (Hignett & McAtamney, 2000; McAtamney & Corlett, 1993; Karhu et al., 1977; Moore & Garg, 1995; Li & Buckle, 1999; Kee & Karwowski, 2007). REBA'nın makro duruş analizinde; JSI'nın ise ince motor hareketleri, bilek deviasyonu, kavrama kuvveti ve hareket sıklığı gibi mikro düzey risklerde etkili olduğu birçok çalışmada doğrulanmıştır (Vieira & Kumar, 2005; Gallagher & Heberger, 2013). NIOSH (1993) ve Waters et al. (1993), 10–15 kg üzeri manuel yük kaldırmanın bel ve omurga yapısı üzerinde yüksek biyomekanik baskı yarattığını göstermiştir. Bunun yanı sıra etiketleme, konektör yerleştirme, kablo demeti montajı gibi tekrara dayalı ince işlerde yüksek frekanslı el-bilek hareketlerinin Strain Index skorlarını artırdığı literatürde geniş biçimde rapor edilmiştir (Norman et al., 1998; Zalk & Nelson, 2008). Son yıllarda yapılan çalışmalar ergonomik iyileştirmelerin yalnızca çalışan sağlığını değil, üretim kalitesini, çevrim sürelerini ve işletme verimliliğini de anlamlı biçimde artırdığını göstermektedir (Habib et al., 2019; Davis & Marras, 2000; EU-OSHA, 2021). Tüm bu bulgular, otomotiv montaj hatlarında ergonomik risklerin çok boyutlu olduğunu ve REBA ile JSI gibi tamamlayıcı yöntemlerin birlikte kullanılmasının literatürde önerilen en etkili yaklaşım olduğunu ortaya koymaktadır.

3. MATERYAL VE METOD

Materyal ve metot bölümünde, çalışmanın kapsamını oluşturan otomotiv montaj hattındaki seçili istasyonlar, veri toplama süreci ve kullanılan gözlemsel analiz teknikleri ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Bu kapsamda REBA ve JSI yöntemleri, duruş değerlendirmesi ve el-bilek zorlanmalarının analizi amacıyla sistematik biçimde uygulanmıştır. Gözlemler sırasında iş akışı, çevrim süreleri, çalışma yüksekliği ve tekrarlayıcı hareket özellikleri kaydedilmiş; her istasyon için postür, kuvvet ve hareket sıklığına ilişkin ergonomik parametreler belirlenmiştir. Bu bölüm, ergonomik değerlendirmenin bilimsel geçerliliğini sağlamak üzere izlenen tüm adımları bütüncül bir yaklaşımla sunmaktadır.

3.1. REBA (Rapid Entire Body Assessment) Yöntemi

REBA (Rapid Entire Body Assessment) yöntemi, Hignett ve McAtamney (2000) tarafından geliştirilmiş bir ergonomik analiz aracıdır. Yöntemin amacı, çalışanların duruşlarını, hareketlerini ve taşıdıkları yükleri analiz ederek kas-iskelet sistemi risk düzeyini belirlemektir. REBA, özellikle hizmet, imalat ve sağlık sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

REBA, hızlı, kolay uygulanabilir ve objektif sonuçlar vermesi nedeniyle saha uygulamalarında tercih edilmektedir. Bu yöntemde vücut iki ana grupta değerlendirilir:

- Grup A: Boyun, gövde ve bacak duruşları
- Grup B: Üst kol, alt kol ve bilek duruşları

Her bir vücut bölgesi için pozisyon, açı ve yük faktörleri puanlanır. Ardından iki grup birleştirilerek REBA toplam skoru elde edilir (Hignett & McAtamney, 2000).

REBA skoru; duruş, kuvvet, yük, tutuş şekli ve hareket tekrarı gibi kriterler üzerinden değerlendirilir. Sonuçlar aşağıdaki risk düzeylerine göre sınıflandırılır (McAtamney et al., 2004):

REBA Skoru	Risk Seviyesi	Aksiyon Gerekliliği
1	Düşük Risk	Eylem gerekmez
2–3	Orta Risk	Gözlem gerekebilir
4–7	Yüksek Risk	Düzeltici eylem gerekir
8+	Çok Yüksek Risk	Acil eylem gereklidir

REBA'nın avantajı, tüm vücut duruşlarını birlikte değerlendirebilmesi ve duruş bozukluklarının risk derecesini net biçimde ortaya koyabilmesidir. Bununla birlikte yöntemin en önemli sınırlılığı, duruş analizi anlık bir gözleme dayandığı için sürekli tekrarlanan işlerde zamana bağlı değişimleri tam olarak yansıtamamasıdır (Kee & Karwowski, 2007).

Veriler aşağıdaki tekniklerle elde edilmiştir:

- Video analizi (her istasyonda 3 döngü)
- Fotoğraf tabanlı duruş analizi
- Dijital açı ölçer ile gövde/kol/bilek açılarının belirlenmesi
- Yük ölçümü (manuel kaldırma işlemlerinde kg tespiti)
- Tekrarlama sayımı (çaba/dk)
- Çalışma alanı boyutları (yükseklik–mesafe ölçümü)

Duruş açılarını ölçmek için dijital gonyometre kullanılmıştır.

REBA yöntemi için denklem; yük, kavrama ve aktivite faktörleri eklenerek toplam REBA skoru hesaplanmıştır.

$$REBA = f(A, B) + Yük + Kavrama + Aktivite$$

3.2. JSI (Job Strain Index) Yöntemi

Job Strain Index (JSI), Moore ve Garg (1995) tarafından geliştirilen bir yöntem olup, üst ekstremite (el, bilek, ön kol) zorlanmalarını analiz eder. Özellikle tekrarlayıcı görevlerde, kavrama kuvveti, el bileği açısı ve hareket sıklığı gibi değişkenleri değerlendirir.

JSI, altı temel faktörün çarpımı ile oluşturulan bir indekstir:

- Kuvvet yoğunluğu (Intensity of exertion)
- Kuvvet uygulama süresi (Duration of exertion per cycle)
- Çaba sıklığı (Effort frequency)
- El/bilek duruşu (Hand/wrist posture)
- İş temposu (Speed of work)
- Günlük toplam maruziyet süresi (Duration per day)

Bu faktörlerin her biri 1–5 arasında puanlanır ve çarpılarak Strain Index (SI) skoru hesaplanır.

$$SI = a \times b \times c \times d \times e \times f$$

JSI yöntemi, özellikle tekrarlayan manuel işlerin yaygın olduğu montaj hatlarında kullanılır.

Wurzelbacher et al. (2010) tarafından otomotiv endüstrisinde yapılan bir çalışmada, JSI yönteminin REBA'ya göre mikro hareket kaynaklı zorlanmaları daha hassas yakaladığı, ancak genel vücut duruşunu yansıtmakta yetersiz kaldığı belirtilmiştir. Bu nedenle REBA ve JSI yöntemlerinin birlikte kullanımı, hem makro (tüm vücut) hem mikro (el-bilek) düzeyde ergonomik riskleri bütünsel olarak değerlendirmek için önerilmektedir (Li & Buckle, 1999).

JSI değerlendirmesi özellikle bilek ve el ağırlıklı işlerde uygulanmıştır.

Aşağıdaki altı faktör puanlanmıştır:

Tekrarlama (çaba/dk)
Kuvvet
Bilek açısı
Görev süresi yüzdesi
Hareket hızı
Kavrama türü

$$JSI = R \times F \times W \times D \times S \times G$$

➞ JSI > 5 ise yüksek risk kabul edilmiştir.

4. UYGULAMA ve BULGULAR

Bu bölümde, otomotiv montaj hattında yer alan 6 iş istasyonunda inceleme ve uygulamalar gösterilmiştir. REBA ve JSI analizlerinin sonuçları sunulmaktadır. Elde edilen bulgular her istasyon için ayrı ayrı değerlendirilmiş, ardından yöntemler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde, duruş temelli REBA sonuçları ile tekrarlama–bilek odaklı JSI sonuçlarının montaj hattındaki risk profiline nasıl yansıdığı açıklanmıştır.

Tablo 5. Altı İstasyona Ait Ergonomik Risk Analizi (REBA–JSI) ve Aksiyonlar

İstasyon	İş Tanımı	Risk	REBA	JSI	Düzeltici Aksiyon
1. Kapı İç Panel Montajı	Kapı iç panelinin omuz hizasında tutulup vidalanması	Omuz hizasında çalışma, 40° gövde eğimi, uzun süreli statik duruş	9 – Yüksek	8.2 – Yüksek	Çalışma yüksekliği ayarı, pnömatik taşıyıcı, mikro molalar
2. Cam Mekanizması Montajı	Cam motoru ve kablo bağlantılarının dar alanda yapılması	Dar alanda çalışma, 30° gövde eğimi, 25° bilek fleksiyonu, düşük görüş	6 – Orta	7.1 – Orta–Yüksek	Uzatmalı tabanca, ek ışıklandırma, görev rotasyonu
3. Kapı Fitili Yerleştirme	Kapı çevresine kauçuk fitilin bastırılarak uygulanması	Tekrarlayıcı parmak hareketi, hafif gövde eğimi, el kaslarında lokal yorgunluk	5 – Orta	6.4 – Orta	Fitil bastırma aparatı, parmak destekli eldiven, mikro molalar
4. Konektör Yerleştirme	Kablo uçlarına konektör takılması	30° bilek bükülmesi, sürekli el-bilek deviasyonu, ince motor yüklenmesi	4 – Orta	5.8 – Orta	Bilek desteği, ergonomik pense, 45/5 mola kuralı
5. Palet Üzerine İstifleme	10–15 kg kutuların elle kaldırılıp palete dizilmesi	45° bel eğimi, ağır yük kaldırma, tekrarlı kaldır–yerleştir döngüsü	10 – Çok Yüksek	7.4 – Yüksek	Palet yüksekliği ayarı, yarı otomatik lift, iki kişi çalışma
6. Göğüs Paneli Montajı	Göğüs panelinin öne eğilerek ve kol uzatarak yerleştirilmesi	40° gövde eğimi, 60° kol kaldırma, ulaşma mesafesi nedeniyle zorlanma	8 – Yüksek	5.0 – Orta	Döner tabla, ayarlanabilir sehpa, askı aparatı

Şekil duruşlarına ekler bölümünde yer verilmiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışma, otomotiv montaj hattındaki altı iş istasyonunda ergonomik riskleri REBA ve JSI yöntemleriyle değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Yapılan analizler, özellikle gövde eğimi, omuz hizasında çalışma, ağır yük taşıma ve tekrarlayıcı el-bilek hareketlerinin çalışanlar üzerinde yüksek düzeyde fiziksel zorlanma oluşturduğunu göstermiştir. Uygulanan ergonomik düzeltici faaliyetler sonrasında hem REBA hem JSI skorlarında anlamlı düşüşler elde edilmiş; duruş bozuklukları, tekrarlayıcı hareket yükleri ve kuvvet gereksinimleri belirgin şekilde azalmıştır. Bulgular, iki yöntemin birlikte kullanılmasının ergonomik riskleri hem genel vücut postürü hem de el-bilek düzeyinde bütüncül biçimde değerlendirmede etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma, montaj hattı ergonomisinin iyileştirilmesi için uygulanabilir ve bilimsel bir yöntem sunmaktadır. Ayrıca çalışma, montaj hattındaki ergonomik problemlerinin çoğunun iş istasyonu tasarımı, araç-gereç uygunluğu ve çevrim süresi gibi sistematik faktörlerden kaynaklandığını göstermektedir. Bu nedenle ergonomi uygulamalarının yalnızca bireysel çalışana yönelik düzenlemelerle değil, üretim süreçlerinin bütüncül olarak yeniden tasarlanmasıyla daha etkili hale geleceği görülmüştür. Elde edilen bulgular, mühendislik kontrolleri, iş rotasyonu ve antropometrik uyumun, uzun vadeli ergonomik iyileştirmeler için kritik olduğunu doğrulamaktadır. Sonuç olarak, çalışma otomotiv montaj hatlarında ergonomik risk analizinin hem iş sağlığı hem de üretim verimliliği açısından stratejik bir gereklilik olduğunu bilimsel olarak ortaya koymaktadır.

Tablo 4. Ergonomik düzeltici faaliyetlerin REBA ve JSI skorlarına etkisi

Şekil No	İstasyon	REBA Önce	REBA Sonra	İyileşme (%)	JSI Önce	JSI Sonra	İyileşme (%)	Kritik Etki
1	Kapı Montajı – İç Panel	9	**5**	**%44**	8.2	**5.4**	**%34**	Bel ve omuz yükü azaldı
2	Cam Mekanizması Montajı	6	**4**	**%33**	7.1	**5.0**	**%29**	Bilek fleksiyonu düzeldi
3	Fitil Yerleştirme	5	**4**	**%20**	6.4	**4.8**	**%25**	Parmak kuvveti düştü
4	Kablo Demeti – Konektör	4	**3**	**%25**	5.8	**4.1**	**%29**	Mikro hareket azaldı
5	Paketleme – Palet Üzerine İstifleme	10	**6**	**%40**	7.4	**5.6**	**%24**	Ağır yük kaldırma azaltıldı
6	Trim – Göğüs Paneli Montajı	8	**5**	**%37**	5.0	**4.1**	**%18**	Kol uzatma ve yük hafifledi

6. TARTIŞMA

Bu çalışma, otomotiv montaj hattındaki çalışma koşullarının çalışanlarda yüksek mekanik yük oluşturduğunu göstermiştir. Ergonomik risklerin temel nedenleri arasında iş istasyonu yüksekliğinin yetersizliği, operatörün çalışma alanına erişim gereksinimi, kısa çevrim süreleri ve uygun tasarlanmamış el aletleri yer almaktadır. REBA ve JSI yöntemlerinin birlikte kullanılması, risklerin hem makro (bel, omuz, gövde) hem de mikro (el-bilek) düzeyde bütüncül biçimde değerlendirilmesini sağlamıştır. Bulgular, ergonomik sorunların yalnızca çalışan sağlığını değil, üretim kalitesi ve verimliliğini de doğrudan etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle iş istasyonlarının antropometrik verilere göre düzenlenmesi, görev rotasyonu uygulanması ve yardımcı ekipman kullanımının artırılması, sürdürülebilir ergonomik iyileştirmenin temel unsurları olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca işletmelerde ergonomik farkındalığın artırılması, çalışanların doğru postür ve uygun çalışma teknikleri konusunda eğitilmesiyle risklerin önemli ölçüde azaltılabileceği görülmüştür. Bulgular, ergonomi uygulamalarının yalnızca mühendislik değişiklikleriyle değil, davranışsal ve organizasyonel iyileştirmelerle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

BERNARD, B. (1997). *Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors*. Cincinnati: NIOSH Publications.

BRIDGER, R. (2009). *Introduction to Ergonomics*. Boca Raton: CRC Press.

DAVID, G. (2005). Ergonomic Methods for Assessing Exposure to Risk Factors for Work-Related Musculoskeletal Disorders. *Occupational Medicine*, 55(3), 190–199.

DAVIS, K. G., & MARRAS, W. S. (2000). The effects of motion on trunk biomechanics. *Human Factors*, 42(1), 93–105.

DEROS, B., Daruis, D.D.I., & Ismail, A.R. (2014). Assessment of Work-Related Musculoskeletal Disorders in the Automotive Industry. *Journal of Human Ergology*, 43(1), 1–14.

EU-OSHA. (2021). *European Survey Reports on Musculoskeletal Disorders*. European Agency for Safety and Health at Work.

GALLAGHER, S., & HEBERGER, J. R. (2013). Examining risk factors related to low back disorders in manual material handling. *Applied Ergonomics*, 44(5), 633–638.

HABIB, M., Hegazy, A., & Marei, O. (2019). Ergonomic Assessment in Lean Manufacturing Workstations. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 70, 102–112.

HIGNETT, S. & McATAMNEY, L. (2000). Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31(2), 201–205.

KARHU, O., Kansi, P., & Kuorinka, I. (1977). Correcting Working Postures in Industry: A Practical Method for Analysis. *Applied Ergonomics*, 8(4), 199–201.

KEE, D., & KARWOWSKI, W. (2007). A comparison of three observational techniques for assessing postural loads. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 13(1), 3–14.

KROEMER, K. H. E., & GRANDJEAN, E. (2009). *Fitting the Task to the Human*. London: Taylor & Francis.

LI, G., & BUCKLE, P. (1999). Current techniques for assessing physical exposure to work-related musculoskeletal risks. *Ergonomics*, 42(5), 674–695.

MARRAS, W. S. (2000). Occupational ergonomics: balancing the demands. *Spine Journal*, 25(20), 2655–2663.

McATAMNEY, L. & CORLETT, E. N. (1993). RULA: A Survey Method for the Investigation of Work-Related Upper Limb Disorders. *Applied Ergonomics*, 24(2), 91–99.

MOORE, J. S. & GARG, A. (1995). The Strain Index: A Proposed Method to Analyze Jobs for Risk of Distal Upper Extremity Disorders. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 56(5), 443–458.

NORMAN, R., Wells, R., Neumann, W., Frank, J., Shannon, H. & Kerr, M. (1998). A comparison of peak vs cumulative physical work exposure risk factors. *Ergonomics*, 41(9), 1349–1364.

NIOSH. (1993). *Work Practices Guide for Manual Lifting*. U.S. Department of Health and Human Services, Cincinnati.

PUNNETT, L., & WEGMAN, D. H. (2004). Work-related musculoskeletal disorders: the epidemiologic evidence and the debate. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 14(1), 13–23.

VIEIRA, E. R., & KUMAR, S. (2005). Working postures: A literature review. *Journal of Occupational Rehabilitation*, 15(2), 143–156.

WATERS, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A., & Fine, L. J. (1993). Revised NIOSH Equation for the Design and Evaluation of Manual Lifting Tasks. *Ergonomics*, 36(7), 749–776.

ZALK, D. M., & NELSON, D. I. (2008). History and future of control banding. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5(5), 330–346.

EKLER

Bu bölümde çalışmada kullanılan tüm ergonomik analiz şekilleri ve destekleyici görseller sunulmaktadır.



Şekil 1. Kapı paneli montajında öne eğilme ve omuz kaldırma postürü.



Şekil 2. Cam montajında bilek fleksiyon açısını gösteren duruş



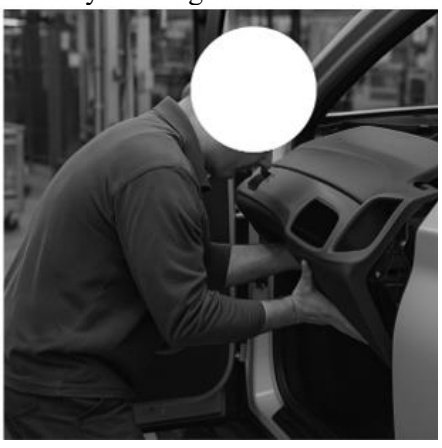
Şekil 3. Kauçuk fitil montajında parmak baskı hareketi.



Şekil 4. Konektör yerleştirmede bilek ükülme açısı



Şekil 5. Kutu kaldırma postüründe bel eğimi 45° ve yük 15 kg.



Şekil 6. Göğüs paneli montajında öne eğilme duruşu.

ASKERİ GEMİLERDE KULLANILAN ST42 ÇELİK NUMUNELERİNİN LAZERLE İŞLENMESİ SONUCU KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

KAMILE ERTÜRK
Kocaeli Üniversitesi, Elektro-Optik Sistem Mühendisliği
kamileerturk43@gmail.com , ORCID:0009-0005-2581-2878

FIRAT ÖZSEKBAN
Kocaeli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
ozsekbanfirat@gmail.com, ORCID:0009-0008-6886-8726

Prof.Dr. ERSIN KAYAHAN
Kocaeli Üniversitesi, Lazer teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (LATARUM),
Teknopark/Kocaeli,
kayahan@kocaeli.edu.tr, ORCID:0000-0001-5933-9824

Özet

Korozyon, metalik malzemelerin kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu çevresel etkilerle bozunması olarak tanımlanmakta ve özellikle denizcilik sektöründe kullanılan çelik yapılarda ciddi yapısal ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Yüksek klorür içerikli tuzlu su, çözünmüş oksijen, nem ve sıcaklık değişimleri gibi agresif ortam koşulları, çelik yüzeylerde korozyon hızını önemli ölçüde artırmakta ve askeri gemiler gibi kritik yapılarda güvenilirlik ve dayanım açısından risk oluşturmaktadır. Bu nedenle, çelik yüzeylerin korozyon direncinin artırılmasına yönelik yeni nesil yüzey modifikasyon tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, deniz uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ST42 çeliğinin korozyon davranışı üzerine lazer yüzey işlemenin etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmada farklı lazer parametreleri (lazer gücü, tarama hızı ve odak uzaklığı) kullanılarak numunelerin yüzeyleri modifiye edilmiştir. İşlem görmüş ve görmemiş numuneler arasında yüzey morfolojisi, pürüzlülük değişimi ve oksit tabaka oluşumu yönünden karşılaştırmalar yapılmıştır. Yüzey karakterizasyonu için optik mikroskopi ve pürüzlülük ölçümleri kullanılmıştır.

Korozyon testlerinde, numuneler tuzlu su ortamına maruz bırakılmış ve korozyon öncesi ve sonrası kütle ölçümleri hassas terazi ile gerçekleştirilmiştir. Böylece lazer işlem parametrelerinin korozyon hızına ve kütle kaybına olan etkisi nicel olarak belirlenmiştir. İlk bulgular, uygun lazer parametreleriyle yüzeyde oluşan ince oksit tabakasının ve modifiye edilmiş mikro-morfolojinin korozyon direncini artırabileceğini göstermektedir.

Elde edilen sonuçların, askeri gemi saclarının hizmet ömrünün uzatılması, bakım maliyetlerinin azaltılması ve yerli lazer teknolojilerinin denizcilik sektöründe yüzey koruma amacıyla kullanılabilirliğine bilimsel altyapı oluşturması beklenmektedir. Çalışma, hem savunma sanayiinde hem de genel yüzey mühendisliğinde lazer tabanlı yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: ST42 çelik, korozyon, lazer yüzey işleme, tuzlu su korozyonu

INVESTIGATION OF THE CORROSION BEHAVIOR OF LASER-TREATED ST42 STEEL SAMPLES USED IN MILITARY SHIPS

Abstract

Corrosion is defined as the degradation of metallic materials through chemical and electrochemical reactions triggered by environmental factors, and it leads to significant structural and economic losses, particularly in steel structures used in the maritime industry. Aggressive environmental conditions such as high-chloride saltwater, dissolved oxygen, humidity, and temperature fluctuations substantially accelerate the corrosion rate on steel surfaces, posing critical risks to reliability and durability in structures such as military vessels. Therefore, new-generation surface modification techniques are required to enhance the corrosion resistance of steel components.

In this study, the effect of laser surface treatment on the corrosion behavior of ST42 steel, which is widely used in marine applications, was investigated. In the experimental work, various laser parameters (laser power, scanning speed, and focal distance) were applied to modify the surface of the specimens. Treated and untreated samples were compared in terms of surface morphology, roughness variation, and oxide layer formation. Optical microscopy and surface roughness measurements were employed for surface characterization.

For corrosion testing, the samples were exposed to a saline water environment, and pre- and post-corrosion mass measurements were conducted using a precision balance. This allowed the quantitative determination of the effects of laser processing parameters on corrosion rate and mass loss. Preliminary findings indicate that an appropriately formed thin oxide layer and the modified micro-morphology generated by laser treatment can enhance corrosion resistance.

The obtained results are expected to contribute to extending the service life of naval steel plates, reducing maintenance costs, and providing a scientific foundation for the use of domestic laser technologies in the maritime sector for surface protection purposes. The study presents an innovative laser-based approach applicable both in the defense industry and in general surface engineering.

Keywords: ST42 steel, corrosion, laser surface treatment, saltwater corrosion

1. GİRİŞ

Korozyon, metalik malzemelerin bulundukları ortam ile gerçekleştirdikleri kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda fiziksel ve mekanik bütünlüklerinin bozulması olarak tanımlanmakta olup, mühendislik uygulamalarında hem güvenlik hem de ekonomik açıdan ciddi tehdit oluşturmaktadır. [1] Özellikle denizcilik sektöründe kullanılan çelik yapılar; tuzlu su, dalga etkileri, sürekli nem, oksijen yoğunluğu, biyolojik faaliyetler ve sıcaklık değişimleri gibi çoklu çevresel faktörlere aynı anda maruz kaldığından korozyon açısından son derece riskli çalışma koşullarına sahiptir. Paslanmaz çelikler, mekanik özellikler açısından diğer çeliklerden çok farklı değildir. Yüksek maliyetlerine rağmen, paslanmaz çelikler yüksek korozyon dirençleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. [2] Deniz ortamındaki klorür iyonlarının yüksek difüzyon kabiliyeti, çelik yüzeylerde pasif filmin hızla çözünmesine yol açmakta ve böylece pitting (çukurcu korozyon) gibi lokalize korozyon türlerini daha yaygın hale getirmektedir [3], [4]. Bu durum, özellikle askeri gemiler, açık deniz platformları, liman yapıları ve yüksek mukavemetli çelik bileşenler açısından operasyonel güvenilirliği doğrudan etkilemektedir. [5] Denizcilikte korozyon kaynaklı bakım-onarım maliyetleri toplam işletme bütçesinin büyük bir kısmını oluşturmakta; uluslararası raporlar denizcilik sektöründeki toplam maliyetlerin yaklaşık %15–20'sinin korozyonla mücadeleye ayrıldığını göstermektedir. Bu bağlamda, deniz ortamında kullanılan çelik malzemelerde korozyon direncini artırmaya

yönelik yenilikçi ve yüksek performanslı yüzey modifikasyon yöntemleri geliştirilmesi hem ekonomik kayıpların azaltılması hem de yapısal güvenliğin artırılması açısından kritik öneme sahiptir. [6] , [7].

Geleneksel koruma yöntemleri boya/kaplama sistemleri, galvanik kaplama, inhibitor kullanımı ve katodik koruma uygulamaları yaygın olarak kullanılmakla birlikte, deniz ortamına özgü yüksek klorür konsantrasyonu ve sürekli mekanik aşınma nedeniyle bu yöntemler zamanla etkinliğini kaybetmekte ve sık bakım gerektirmektedir. Çoğu kaplama, UV ışığına, tuz spreyine ve yüksek akış hızlarına maruz kaldığında bozulmakta; alt yüzeyde ilerleyen korozyonu tespit etmek zorlaşmaktadır. Ayrıca çevresel düzenlemeler, bazı geleneksel kaplama sistemlerinde kullanılan kimyasalların kullanımını sınırlandırmakta; dolayısıyla daha çevre dostu ve sürdürülebilir yöntemlere duyulan ihtiyacı artırmaktadır [4] , [8].

Lazer yüzey işleme teknolojisi, yüksek hassasiyet, tekrarlanabilirlik, temassız işlem, bölgesel modifikasyon imkânı ve malzemenin yüzey özelliklerini mikro ve nano ölçekte değiştirme kapasitesi sayesinde yeni nesil bir yüzey mühendisliği yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Lazerin malzeme yüzeyi ile etkileşimi sırasında meydana gelen hızlı ısıtma–soğutma döngüsü, yüzey tabakasında yeniden ergime ve katılaşma oluşturmakta; bu süreç yüzey morfolojisini doğrudan değiştirmektedir[9] , [10]. Oluşan ince ve kararlı oksit tabakaları, daha homojen mikro-yapı, azaltılmış mikro-çatlak oluşumu, yüzey sertliğinde artış ve pürüzlülük kontrolü gibi etkiler sayesinde lazer işlemi korozyon direncini doğrudan etkileyen temel parametreleri iyileştirmektedir [11].

Literatürde, belirli lazer parametrelerinin uygulanmasıyla çelik yüzeylerde korozyon hızının azaldığı, oksitlenme davranışının daha stabil hale geldiği, çukurlaşmanın geciktirildiği ve yüzeyin daha pasif bir karakter kazandığı gösterilmiştir [12]. Bu nedenle lazer yüzey işleme, özellikle yüksek dayanım gerektiren denizcilik ve savunma sanayii uygulamalarında umut vadeden bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca lazer işleminin yerel olarak uygulanabilmesi, büyük yüzeylerde bile seçici modifikasyon imkânı sağlaması, kimyasal kullanımını azaltması ve üretim hatlarına kolay entegrasyonu, yöntemin endüstriyel uygulanabilirliğini artırmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, lazer işlem parametrelerinin ST42 çelik yüzeylerde oluşturduğu mikroyapısal değişimler detaylı olarak incelenmiş; yüzey pürüzlülüğü, kütle kaybı, yüzeyde oluşan oksit tabakalarının karakteri ve mikro-morfolojik dönüşümlerin korozyon davranışı üzerindeki etkileri sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Çalışmada, farklı lazer güçleri, tarama hızları kullanılarak elde edilen yüzey modifikasyonlarının korozyon performansı üzerindeki rolü nicel verilere dayanarak ortaya konmuştur.

2. MATERYAL VE METOD

Çalışmada kullanılan ST-42 çelik numuneler Gölcük Tersanesi Komutanlığı'ndan temin edilmiş ve her biri 15×15 mm boyutlarında, 4 mm kalınlığında olacak şekilde giyotin makasında kesilmiştir. Numunelerin tümü, ölçüsel kararlılığın korunması ve yüzey hazırlama süreçlerinde tekrarlanabilirliğin sağlanması amacıyla epoksi ile kalıplanmış; polimerizasyon süreci tamamlandıktan sonra mekanik olarak dayanıklı bir matris elde edilmiştir. Bu yöntem, hem yüzey hazırlığı sırasındaki mekanik yükleri azaltmış hem de korozyon deneyleri öncesi ve sonrası tartımlarda hassasiyetin korunmasına katkı sağlamıştır.

Kalıplama işlemini takiben numune yüzeyleri, Kocaeli Üniversitesi Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan metalürjik parlatma sistemi kullanılarak sırasıyla 400, 800 ve 1200 grit SiC zımpara kağıtları kullanılarak parlatılmıştır. Artan grit numarasıyla yüzeydeki çiziklerin derinliği azalmış, pürüzlülük değerleri düşmüş ve tüm numunelerde standartlaştırılmış bir yüzey kalitesi elde

edilmiştir. Böylece hem lazer uygulamasının yüzey üzerindeki etkilerinin hem de korozyon davranışının güvenilir şekilde karşılaştırılmasına uygun başlangıç koşulları sağlanmıştır.

Yüzey hazırlığı tamamlanan numuneler, ML20 fiber lazer sistemi kullanılarak işlenmiştir. Lazer gücü 16 W, tarama hızı 50 mm/s, atım frekansı 100 kHz, çizgiler arası mesafe 10 µm ve odak uzaklığı 20 cm olarak seçilmiştir. Bu parametreler, yüzeyde kontrollü ergime ve ardından yeniden katılaşma süreçlerini tetiklemiş; ince oksit tabakalarının oluşumu, lokal yüzey yükseltileri ve mikro ölçekte topografik değişiklikler meydana getirmiştir. Böylece lazer modifikasyonunun çelik yüzeyin korozyon direncine etkilerini incelemeye uygun kontrollü ve tekrarlanabilir bir yüzey morfolojisi oluşturulmuştur.

Lazerle işlenen ve referans olarak hazırlanan işlenmemiş numunelerin korozyon davranışları ASTM B117 standardına uygun tuzlu ortam koşullarında değerlendirilmiştir. Test öncesinde tüm numuneler etanol ile temizlenmiş, kontrollü bir şekilde kurutulmuş ve yüksek hassasiyetli analitik terazi ile başlangıç ağırlıkları kaydedilmiştir. Numuneler daha sonra belirlenen süre boyunca tuzlu sprey ortamına maruz bırakılmış; test süresi tamamlandıktan sonra yüzeyde biriken korozyon ürünleri ilgili standartlarda tanımlanan kimyasal temizleme protokollerine uygun olarak uzaklaştırılmıştır, yüzeyde nem kalmasının önüne geçilmiş ve ortam havasında tamamen kurutulmuştur Malzemenin korozyon değerlerinde kütle azalma farkları göz önünde tutulmuştur. Tamamen kurutulan numunelerin son kütleleri (W1) hassas terazi ile ölçülmüş ve böylece korozyon kaynaklı toplam kütle kaybı (ΔW) Eşitlik (1) yardımıyla hesaplanmıştır. Bu bağıntıda W0, numunenin deney öncesi kütlesini; W1 ise temizlenmiş ve kurutulmuş son durumdaki kütlesini ifade etmektedir.

$$\Delta W = W0 - W1 \quad (1)$$

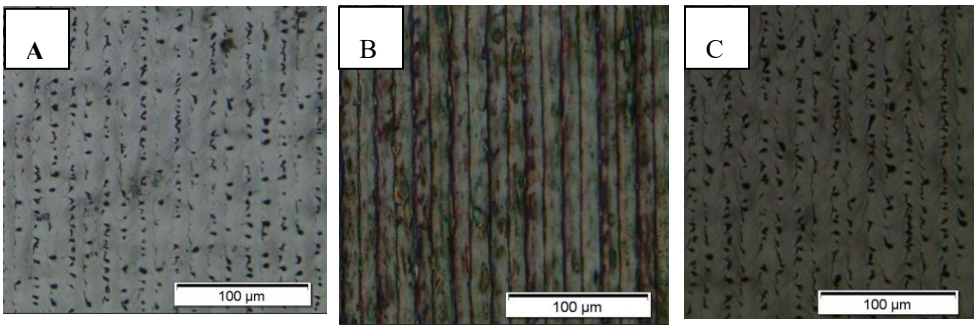
Hesaplanan ΔW değerleri, farklı yüzey hazırlama işlemlerinin, grit seviyelerinin ve lazerle yüzey işleme parametrelerinin çeliğin tuz püskürtme ortamındaki korozif davranışı üzerindeki etkilerini karşılaştırmak amacıyla değerlendirilmiştir.

Elde edilen veriler, lazerle yüzey işleme sonrası oluşan mikro yapısal değişimlerin ve farklı polisaj grit seviyelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde oluşturduğu etkinin, ASTM B117 koşullarında korozyon performansını nasıl değiştirdiğine dair kapsamlı bir analiz yapılmasına imkân tanımıştır. Böylece her bir yüzey durumu için gözlenen korozyon davranışları hem nicel (ΔW) hem de nitel (mikro yapı ve yüzey morfolojisi) olarak değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

3. Polisaj ve Lazer İşleminden Sonraki Yüzey İncelemeleri

3.1 Optik Mikroskop Görüntü Analizi

Polisaj işlemi ile yüzey pürüzlülüğü standardize edilen numuneler, ardından farklı lazer parametreleri uygulanarak işlenmiştir. İşlem sonrası yüzeyler optik mikroskop altında incelenmiş ve görüntüler kaydedilmiştir. Mikroskop görüntüleri, lazer parametrelerinin yüzey topografisi üzerindeki etkilerini açıkça göstermektedir. Görüntülerde, zımparalanmış homojen yüzeyin lazer işlemiyle belirgin biçimde değiştiği, mikro-morfolojide farklılaşmalar ve lokal yüzey düzensizliklerinin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, lazer parametrelerinin kontrolü ile yüzeyin mikro yapısının modifiye edilebileceğini ve ilerleyen korozyon deneyleri için temel bir yüzey karakterizasyonu sağladığını göstermektedir.



Şekil 1. Zımparalanmış ve lazerle işlenmiş numunenin optik mikroskop görüntüsü a:100, b:800, c:1200 grid

3.2 Pürüzlülük Ölçümleri

Polişaj işlemi uygulanmış numuneler 400, 800 ve 1200 grit zımpara kağıtları ile hazırlanmış ve yüzey pürüzlülükleri ilk aşamada ölçülmüştür. Bulgular, grit numarası arttıkça yüzey pürüzlülüğünün belirgin biçimde azaldığını göstermektedir. Aynı numuneler korozyon testine tabi tutulduktan sonra yüzey pürüzlülükleri tekrar ölçülmüş ve bu değerler tabloya eklenmiştir. Korozyon sonrası elde edilen pürüzlülük artışları, yüzeyde meydana gelen oksitlenme, lokal çukur oluşumu ve yüzey bozulmalarının bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Polisaj Grit Numarası ve Korozyon Sonrası Duruma Bağlı Olarak Numunelerin Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

POLISHING GRIT	PÜRÜZLÜLÜK (Ra)	KOROZYON SONRASI (Ra)
s-400	0.066 µm	0.773 µm
s-800	0.062 µm	0.737 µm
s-1200	0.043 µm	0.239 µm

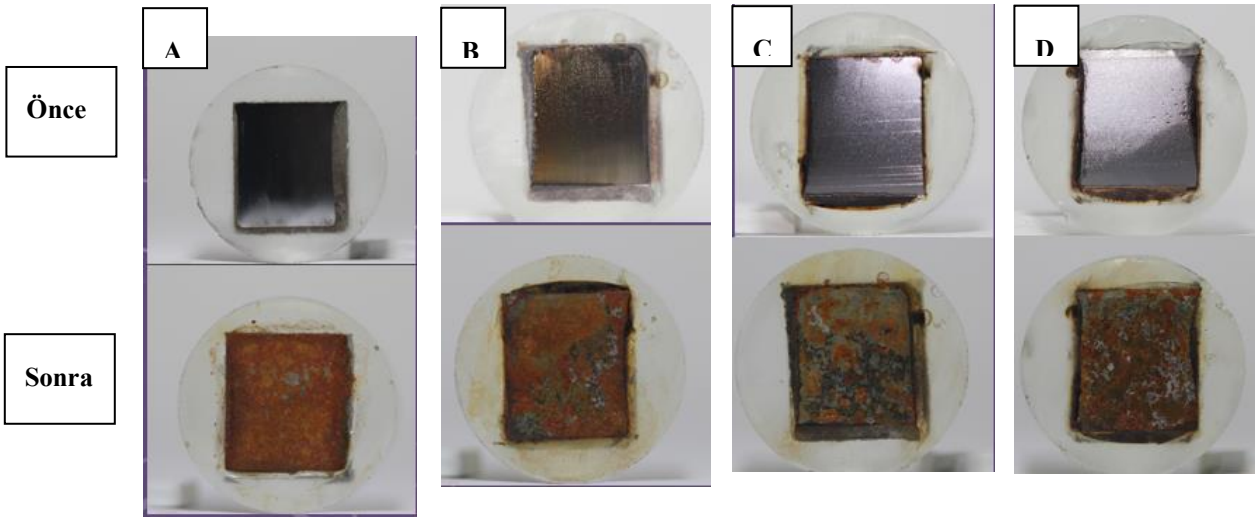
Tablo 2. Polisaj Gritlerine Göre Numunelerin Lazer Uygulaması Öncesi/Sonrası ve Korozyon Sonrası Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

POLISHING GRIT	PÜRÜZLÜLÜK (Ra)	KOROZYON SONRASI (Ra)
s-400	0.462 µm	0.560 µm
s-800	0.104 µm	0.736 µm
s-1200	0.220 µm	0.668 µm

Lazer markalama, f = 20 cm lens odak uzaklığı, d = 10 µm çizgi aralığı, P = 16 W güç, V = 50 mm/s tarama hızı ve f = 100 kHz frekans ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları, lazer işlemi sonrasında yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir artış meydana geldiğini göstermektedir. Bu artışın, lazer kaynaklı lokal erime, hızlı soğuma ve buharlaşma süreçlerinin oluşturduğu mikro-çukur ve çıkıntılardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Ayrıca, lazer uygulanmış numunelerin korozyon sonrası yüzey pürüzlülük değerleri de tabloda sunulmuş olup, korozyon etkisiyle *Ra* değerlerinde ilave bir artış meydana geldiği görülmüştür. Bu durum, korozif ortamın özellikle lazerle modifiye edilmiş mikro-tekstür üzerinde çukurlaşma ve malzeme kaybını artırdığını göstermektedir.

3.3. Korozyon Sonrası Yüzey Değişimleri

Korozyon testi sonrasında, her türlü yüzey modifikasyonundan yoksun olan referans numunenin yüzeyinde yoğun paslanma, belirgin oksit tabakaları ve geniş alanlı bozunmalar gözlemlenmiştir. Buna karşılık, 400, 800 ve 1200 grit polisajdan geçirilip lazerle yüzey işleme uygulanan numunelerde korozyonun çok daha sınırlı olduğu belirlenmiştir. Lazer işlemi sonrası oluşan modifiye yüzey yapısı, özellikle daha düzgün ve kontrollü mikro-topografya sağlayarak korozif ortamla etkileşimi azaltmış; dolayısıyla yüzeydeki paslanma miktarı ve korozyon alanı referans numuneye kıyasla belirgin şekilde düşmüştür. Bu sonuçlar, lazerle yüzey işlemenin, farklı polisaj seviyelerinde bile çelik yüzeylerin korozyon dayanımını iyileştirici bir etki yarattığını ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Tuz püskürtme testi öncesi ve sonrası numunelerin yüzey görünümleri:(a) Sadece 400 grit polisaj uygulanmış numune, (b) 400 grit polisaj uygulanmış ve ardından lazerle yüzey işlenmiş numune, (c) 800 grit polisaj uygulanmış ve ardından lazerle yüzey işlenmiş numune, (d) 1200 grit polisaj uygulanmış ve ardından lazerle yüzey işlenmiş numune.

3.4. Korozyon Sonrası Kütle Kaybı

Tuz püskürtme testleri sonrasında numune yüzeylerinde oluşan tuz kalıntıları ve gevşek korozyon ürünleri, gerçek metal kaybının doğru belirlenmesini engellediğinden analiz öncesi uygun temizleme işlemi uygulanmıştır. Bu kapsamda numuneler, standarda uygun şekilde metal alt tabakaya zarar vermeyen kimyasal bir çözelti(üre) ile temizlenmiş, ardından saf su ile durulanıp kontrollü koşullarda kurutulmuştur. Temizlik sonrası yapılan ikinci tartım ile numunelerin yalnızca korozyona bağlı **net kütle kaybı** hesaplanmıştır. Böylece farklı yüzey hazırlama yöntemlerinin (400–800–1200 grit polisaj ve lazerle yüzey işleme) korozyon davranışına etkisi değerlendirilebilmiştir.

Tablo 3: İşlemsiz, Polisajlı ve Lazerle İşlenmiş Numunelerde Kütle Kaybı Değişimi

Numuneler	İlk Kütle (W0)	Korozyon Sonrası (W1)	Korozyon Kaynaklı Toplam Kütle Kaybı (ΔW)
Hiçbir işlem yapılmayan	19,8112 g	19,7877 g	$241x10^{-4}$ g
400 Grit	18,8639 g	18,8502 g	$137x10^{-4}$ g

400 Grit+Lazer Uyg.	18,9760 g	18,9750 g	$10x10^{-4}$ g
800 Grit	20,2463 g	20,2125 g	$338x10^{-4}$ g
800 Grit+Lazer Uyg.	17,9057 g	17,8998 g	$59x10^{-4}$ g
1200 Grit	19,4747 g	19,4720 g	$27x10^{-4}$ g
1200 Grit+Lazer Uyg.	19,7241 g	19,7217 g	$24x10^{-4}$ g

5. SONUÇ

Hiçbir yüzey işlemi uygulanmamış referans numunesinde kütle kaybının en yüksek seviyede olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, işlenmemiş yüzeyin hem daha düzensiz bir topografyaya sahip olması hem de korozif ortama karşı daha düşük dayanım göstermesiyle ilişkilidir. Yüzeyin doğal hâliyle bırakılması, tuzlu su çözeltisinin malzeme ile temasını kolaylaştırmış ve korozyon sürecinin hızla ilerlemesine neden olmuştur.

Polisaj uygulanmış numunelerde ise grit numarasındaki artışa bağlı olarak kütle kaybının belirgin biçimde azaldığı gözlemlenmiştir. Yüzeyin giderek daha pürüzsüz hâle gelmesi, korozif türlerin yüzeyle etkileşimini sınırlamış ve malzemenin çözünme eğilimini azaltmıştır. Bu durum, yüzey hazırlama prosesinin korozyon performansı üzerindeki etkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Lazerle yüzey işlenen numunelerde ise kütle kaybının en düşük değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Lazer işlemi, yüzeyde yeniden katılaşma bölgeleri oluşturarak daha kompakt ve stabilize bir mikro-yapı meydana getirmiş; bu yapı, korozif ortamın yüzeye nüfuzunu önemli ölçüde azaltmıştır. Ayrıca lazer taramasıyla oluşan kontrollü yüzey modifikasyonları, malzemenin genel korozyon davranışını iyileştiren daha homojen bir yüzey karakteristiği sağlamıştır.

Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması ve lazerle gerçekleştirilen mikro-yapısal modifikasyonların çelik malzemelerin korozyon direncini belirgin şekilde artırdığı görülmektedir. Özellikle lazer işleminin, farklı polisaj seviyelerinde dahi ilave bir koruyucu etki oluşturarak malzemenin korozyon performansını anlamlı ölçüde yükselttiği deneysel verilerle doğrulanmıştır. Bu bulgular, lazer tabanlı yüzey modifikasyonlarının yüksek koroziv ortamlarda kullanılacak çelik yüzeyler için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (LATARUM) alt yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu imkân için teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKÇA

[1] EL IBRAHIMI, B. ve GUO, L. (2020), Azole-Based Compounds as Corrosion Inhibitors for Metallic Materials, A. Kuznetsov (ed.) içinde, *Azoles – Synthesis, Properties, Applications and Perspectives*, U.K.: IntechOpen. . https://doi.org/10.5772/intechopen.93040

[2] TÜRKAN, M. ve KARAKAŞ, Ö. (2019). The Influence of Corrosion on the Mechanical Behavior of AISI 316L Stainless Steel Welds. *Mechanika*, 25(2), 114–118.

[3] CHEN, Z., JİN, Y., CHEN, H., HU, S., JİANG, Y., WU, M., ZHU, B., ZHANG, W. ve Li, W. (2024). Cellular automata simulation of pitting corrosion of stainless steel in marine environments. *Materials Today Communications*, 41, 110555. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110555

[4] DALGIÇOĞLU, B. (2021). *Gemi saçlarının farklı deniz şartlarında korozyon davranışlarının incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

[5] BABU, P. K. S., MATHIAZHAGAN, A., ve NANDAKUMAR, C. G. (2014), Corrosion health monitoring system for steel ship structures, *International Journal of Environmental Science and Development*, 5(5), 491–495. https://doi.org/10.7763/IJESD.2014.V5.533

[6] BORUT, M. ve BAYRAKTAR, S. (2004), Gemilerde korozyon analizi ve korozyonu etkileyen faktörler, Gemi ve Denizcilik Teknolojisi içinde (s. 4–8), İstanbul: TAYFAJANS.

[7] DAVİS, J. R., (2001). "Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance", ASM International, ISBN 0-87170-700-4, Materials Park, Ohio, USA, https://doi.org/10.2339/politeknik.1001951

[8] ELÇİÇEK, H., KARAOĞLANLI, A. C. ve DEMİREL, B. (2011), Gemicilik endüstrisinde korozyon problemi ve katodik koruma uygulamaları, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16–18 Mayıs 2011, Elazığ.

[9] ÇOLPAN, M. H. (2008). *Lazer gücünün fonksiyonu olarak lazer yüzey işleme üzerine bir çalışma* (Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı, Konya).

[10] YILDIZ, U. T., VAROL, T., PÜRÇEK, G., ve AKÇAY, S. B. (2024), A review on the surface treatments used to create wear and corrosion resistant steel surfaces, *Journal of Polytechnic*, 27(1), https://doi.org/10.2339/politeknik.1001951

[11] ARİFİN, M. Z., KUSTONO, D., ve WIDIYANTI, W. (2020), Characteristics of ASTM A36 steel plate corrosion rate due to bending treatment with angle, corrosion media, and corrosion time variations, Journal of Engineering and Applied Technology, 1(1), 21–29. https://doi.org/10.21831/jeatech.v1i1.31478

[12] YORULMAZ, F. N., DURMUŞ, H., ve ÇÖMEZ, N. (2022), Kimyasal bileşimin paslanmaz çelik kaplamaların mekanik ve korozyon özelliklerine etkisi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Özel Sayı (34), 485–491. https://doi:10.31590/ejosat.1082931

BURSA MERKEZ İLÇELERİNİN ANTROPOJENİK JEOMORFOLOJİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

EDANUR ÇALIŞKAN
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Coğrafya Anabilim Dalı
edanurtosun99@gmail.com, ORCID: 0009-0006-7966-7036

Dr. Öğr. Üyesi EBUBEKİR KARAKOCA
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü
ebubekir.karakoca@bilecik.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6454-2082

Özet

Günümüzde artan nüfus, yükselen ekonomik gereksinimler ve yoğunlaşan arazi kullanımı, insan kaynaklı jeomorfolojik etkilerin hem kapsamını hem de şiddetini giderek daha görünür hâle getirmektedir. Bu durum, insan faaliyetlerinin yer şekillerinin oluşumu ve dönüşümü üzerindeki rolünü inceleyen antropojeomorfoloji disiplininin önemini belirgin biçimde artırmıştır. Nüfus artışı ve ekonomik faaliyetlerin yoğun olduğu ülkelerde antropojenik jeomorfolojik değişimlerin mekânsal etkileri daha geniş alanlara yayılmakta ve morfolojik sistemler üzerindeki sonuçları daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Türkiye'de ise özellikle İstanbul, İzmir ve Bursa gibi sanayileşme ve kentleşmenin yoğun olduğu metropoller, insan etkinliklerinin jeomorfolojik izlerinin en net gözlemlendiği alanlar olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, Bursa ilinin merkez ilçelerinde yoğunlaşan antropojenik faaliyetlerin jeomorfolojik süreçler ve birimler üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Bu doğrultuda, arazi gözlemlerine dayalı saha verileri ile güncel uydu görüntülerinden yararlanılmış; ayrıca antropojeomorfoloji çalışmalarında yaygın olarak kullanılan Potansiyel Antropojenik Değişim İndeksi (PAJİ) hesaplanarak bölgedeki antropojenik dönüşüm düzeyi nicel olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, nüfus artışı ve göç hareketlerinin hızlanmasıyla birlikte Bursa'nın merkez ilçelerinin en yoğun biçimde dönüştürülen alanlar hâline geldiğini göstermektedir. Bu ilçelerde özellikle taş ocakçılığı gibi madencilik faaliyetleri, hafriyat ve dolgu alanlarının genişlemesi, yapılaşma yoğunluğundaki artış, karayolu ulaşım projelerinin yaygınlaşması ile rekreasyon alanları ve sulama kanalları gibi insan kaynaklı yapı ve kullanım biçimlerinin belirgin biçimde arttığı tespit edilmiştir. Bu unsurlar, doğal morfodinamik süreçlerin işleyişini farklı ölçekte değiştiren, sınırlandıran veya yeniden yönlendiren antropojenik etkiler oluşturmaktadır. PAJİ analizine göre Bursa merkez ilçelerinde hesaplanan 0,30 antropojenik etki değeri, bölgenin antropojeomorfolojik açıdan orta düzeyde bir dönüşüm yaşadığını ortaya koymaktadır. Bu değer, mevcut antropojenik baskıların uygun planlama ve koruma stratejileriyle sürdürülebilir biçimde yönetilebileceğini; ancak gerekli önlemler alınmadığı takdirde antropojenik süreçlerin daha yüksek etki seviyelerine ulaşma riskinin bulunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelime: Antropojenik Jeomorfoloji, Bursa, İnsan Kaynaklı Değişimler

EVALUATION OF THE CENTRAL DISTRICTS OF BURSA IN TERMS OF ANTHROPOGENIC GEOMORPHOLOGY

Abstract

Today, increasing population, rising economic demands, and intensifying land use have made anthropogenic geomorphological impacts increasingly visible in both extent and intensity. This situation has significantly

elevated the importance of anthropogeomorphology, a discipline that examines the role of human activities in the formation and transformation of landforms. In countries where population growth and economic activities are concentrated, the spatial effects of anthropogenic geomorphological changes extend over broader areas, and their consequences on morphological systems become more evident. In Turkey, major metropolitan areas such as Istanbul, İzmir, and Bursa—where industrialization and urbanization are particularly intense—stand out as regions where the geomorphological imprints of human activities are most distinctly observed.

The primary aim of this study is to reveal the effects of anthropogenic activities concentrated in the central districts of Bursa on geomorphological processes and units. To this end, field-based observations were combined with up-to-date satellite imagery, and the Potential Anthropogenic Change Index (PACI), widely used in anthropogeomorphological studies, was calculated to quantitatively assess the degree of anthropogenic transformation in the region.

The findings indicate that, with accelerating population growth and migration, the central districts of Bursa have become the most intensively transformed areas of the city. In these districts, significant increases were identified in activities such as quarrying, the expansion of excavation and fill areas, rising construction density, the proliferation of road transportation projects, as well as the development of recreational zones and irrigation canals. These features constitute anthropogenic impacts that alter, constrain, or redirect natural morphodynamic processes at various scales. According to the PACI analysis, the calculated value of 0.30 for Bursa's central districts indicates a moderate level of anthropogenic transformation. This suggests that existing anthropogenic pressures can be managed sustainably through appropriate planning and conservation strategies; however, if necessary measures are not taken, there is a risk that anthropogenic processes will reach higher levels of impact.

Keywords: Anthropogenic Geomorphology, Bursa, Human-Induced Changes

1. GİRİŞ

Son yıllarda hızla nüfusun artması, ekonomik gereksinimlerin yükselmesi, teknolojik imkanların gelişmesi ve arazi kullanımındaki değişimler insan kaynaklı jeomorfolojik etkilerin kapsamını ve şiddetini belirgin bir şekilde görünür hale getirmektedir (Goudie, 2006). Bu durum, insan faaliyetlerinin yer şekillerinin oluşumu ve dönüşümü üzerindeki rolünü inceleyen antropo-jeomorfoloji disiplininin önemini belirgin biçimde artırmıştır (Uncu & Karakoca, 2021).

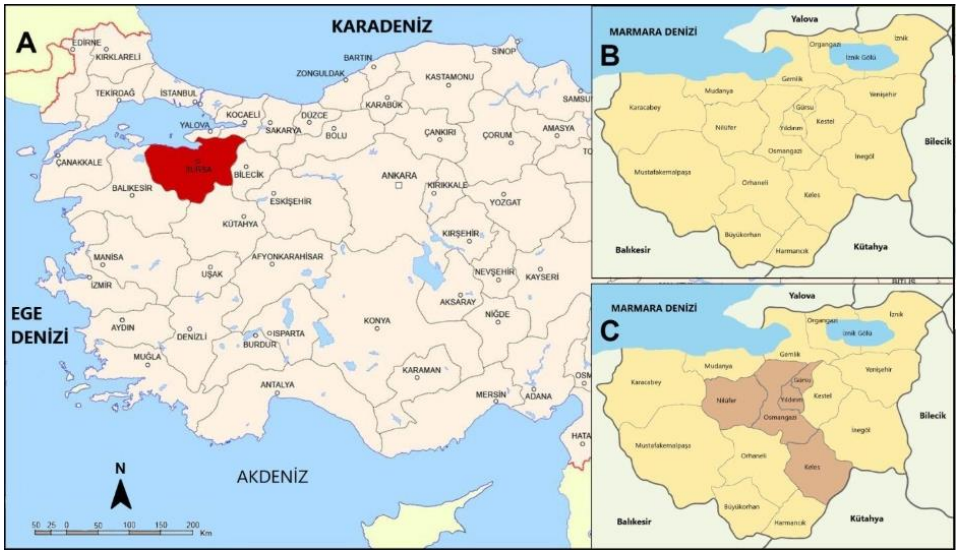
1.1. Türkiye'de Antropojenik Jeomorfoloji Çalışmalarının Gelişimi

Türkiye'de antropojenik jeomorfoloji araştırmaları özellikle 2000'li yıllardan sonra belirgin bir şekilde gelişme göstermiştir. Bu gelişimin temel nedenleri arasında hızlı kentleşme, kıyı alanlarının doldurulması, maden ve taş ocakçılığı faaliyetlerinin artması, büyük ölçekli yol ve tünel projelerinin yaygınlaşması ve tarım alanlarının genişlemesi yer almaktadır (Goudie, 2006; Erkal ve Taş, 2013; Ertek, 2017).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, antropojenik etkilerin Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerinde yüzey şekillerini nasıl dönüştürdüğünü açıkça ortaya koymaktadır Ertek & Erginal, 2006; Şerifaki, 2006; Alkan, 2008; Özşahin, 2013; Uncu & Karakoca, 2021; Uzun, 2021). Bu çalışmalar, insan etkisinin birçok alanda doğal süreçlerin önüne geçtiğini ve bölgesel olarak kalıcı morfolojik dönüşümler yarattığını ortaya koymaktadır.

1.2. Çalışma Sahasının Yeri ve Sınırları

Bursa ili, Marmara Bölgesi'nin güney kesiminde 40° kuzey paraleli ile 29° doğu meridyeninin kesişim noktasında yer almaktadır. İdari olarak kuzeyde Yalova ve Marmara Denizi, batıda Balıkesir, doğuda Bilecik, güneyde ise Kütahya ve Eskişehir ili ile sınırlandırılmaktadır. Çalışma sahası Bursa'nın merkez ilçeleri olan Osmangazi, Yıldırım, Nilüfer, Gürsu ve Kestel ilçelerini kapsamaktadır. Bu konum özellikleri, Bursa'yı hem dağ–ova etkileşiminin belirgin bir şekilde hissedildiği bir morfolojik geçiş kuşağı hem de sanayi ve kentleşme dinamiklerinin yoğunlaştığı bir sosyo-ekonomik gelişim alanı hâline getirmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma sahasının lokasyon haritası.

2. ÇALIŞMADA KULLANILAN VERİ VE YÖNTEM

Bu çalışmanın amacı, Bursa merkez ilçelerinde insan faaliyetlerinin yer şekillerinin oluşumu ve dönüşümü üzerindeki etkisinin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Bu doğrultuda ilk olarak konuya ve çalışma alanına ilişkin kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bilimsel kaynaklar ayrıntılı biçimde incelenerek çalışmanın kapsamı belirlenmiştir. Daha sonra çalışmada kullanılmak üzere Harita Genel Komutanlığı'ndan 1:100.000 ölçekli topografya ve Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nden jeoloji haritaları, ALOS GDSM'den 12,5 m çözünürlüklü DEM verisi, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden iklim verileri, Türkiye İstatistik Kurumu'ndan (TÜİK) adrese dayalı nüfus kayıt sistemi verileri, Bursa Büyükşehir Belediyesi'nden 1:5.000 ve 1:50.000 ölçekli imar planları verileri ve uydu görüntüleri (1985-2022 yılları arası) temin edilmiştir. Bu veriler ArcMap 10.8 yazılımında kullanılarak sahanın detaylı olarak çeşitli haritaları üretilmiştir. Bununla birlikte, elde edilen bulgular arazi gözlemleri ile desteklenmiştir.

Son olarak, Bursa'nın merkez ilçelerindeki antropojenik kökenli faaliyetlerin jeomorfolojik süreç ve birimler üzerinde etkisini ortaya koyabilmek amacıyla Nir (1983) tarafından hazırlanan "Potansiyel Antropojenik Jeomorfoloji İndeksi (PAJİ)" kullanılmıştır. PAJİ, nüfus, eğitim durumu, iklim özellikleri ve rölyef koşulları gibi değişkenleri esas alarak bir alan üzerindeki insan kaynaklı baskıyı nicel olarak değerlendirmeyi mümkün kılan bir indekstir. İndekste kullanılan değişkenler ŞN (havzadaki şehir

nüfusunun oranı), OYB (okuma-yazma bilmeyen nüfusun oranı), Ki (iklim koşullarını) ve Kr (rölyef koşulları) olarak tanımlanmaktadır (Tablo1).

$$PAJİ = \frac{ŞN + OYB}{2} \times \frac{1}{100} \times (Ki + Kr)$$

Tablo1. Potansiyel antropojenik jeomorfoloji indeksinde kullanılacak iklim ve rölyef değerleri (Nir, 1983).

İklim Koşulları (Ki)	***Değer***	***Rölyef Koşulları (Kr)***	***Değer***
Ekvatoral İklim	0,6	**Ovalar**	0,2
Muson ve Savan İklimi	0,8	**Tepeler**	0,4
Kurak ve Yarı kurak İklim	0,6	**Plato Sahaları**	0,5
Ilıman İklim	0,4	**Orta Yükseklikte Dağlık Alanlar**	0,6
Soğuk İklim	0,6	**Yüksek Dağlık Alanlar**	0,8
Kutup İklimi	0,4		

3.BULGULAR

Günümüzde insan etkisi, doğal jeomorfolojik süreçlere kıyasla giderek daha belirgin hale gelmektedir. Tektonizma veya volkanizma gibi iç kuvvetlere göre niceliksel olarak sınırlı görünse de insan, yüzey şekillenmesini yönlendiren dış süreçleri önemli ölçüde dönüştürmekte ve kimi durumlarda doğal dinamikleri aşarak kalıcı morfolojik değişiklikler yaratmaktadır. (Ertek, 2017). Bu bağlamda antropojenik jeomorfoloji, insan etkisiyle oluşan veya biçimlenen yüzey şekillerini inceleyen ve uygulamalı jeomorfolojiyle doğrudan ilişkili bir alt disiplin olarak giderek önem kazanmaktadır (Cooke vd., 1982; Goide, 2013; Szabo, 2010). İnsan faaliyetlerinin jeomorfolojik etkileri, genel olarak doğrudan ve dolaylı etkiler olmak üzere iki ana kategori altında sınıflandırılmaktadır.

3.1 Doğrudan Meydana Gelen Değişiklikler

Doğrudan insan müdahalesi, jeomorfolojik süreçler üzerinde hızla ve somut değişiklikler yaratmaktadır. Bu değişiklikler, malzeme alımı, malzeme depolanması ve karma değişiklikler olarak sınıflandırılabilir. Bu alt başlıklar, insanın arazi üzerindeki etkisini daha ayrıntılı incelemeyi mümkün kılmaktadır.

3.1.1 Malzeme Alımına Bağlı Değişiklikler

Doğal süreçlerin uzun zaman ölçeklerinde oluşturduğu topoğrafik değişimler, insan etkisiyle çok daha kısa sürede dönüştürülebilmektedir. Bu durumun en belirgin örneklerinden biri, malzeme alımına dayalı faaliyetlerin yürütüldüğü madencilik ve taş ocaklarıdır. Türkiye'de artan hammadde talebi doğrultusunda bu alanların sayısı hızla çoğalmış ve doğal topoğrafyada dikkate değer değişimler ortaya çıkmıştır (Uncu ve

Karakoca, 2021). Bu sahalarda yapılan kazılar, yalnızca jeomorfolojik birimleri tahrip etmekle kalmamakta; aynı zamanda oluşan moloz ve atık yığınları çeşitli ekolojik sorunlara neden olmaktadır. Nitekim Bursa'nın Nilüfer ilçesi çevresindeki taş ocakları ile Orhaneli ve Harmancık'taki maden sahaları, insan faaliyetlerinin oluşturduğu yapay krater benzeri çukurlarla antropojenik değişimin boyutunu açık bir şekilde göstermektedir (Resim 1).



Resim 1. Nilüfer ilçesi çevresinde (2022) (sol) bulunan taş ocağı ile Keles ilçesi yakınlarındaki taş ocağı (2025) (sağ).

3.1.2. Malzeme Depolanmasına Bağlı Değişiklikler

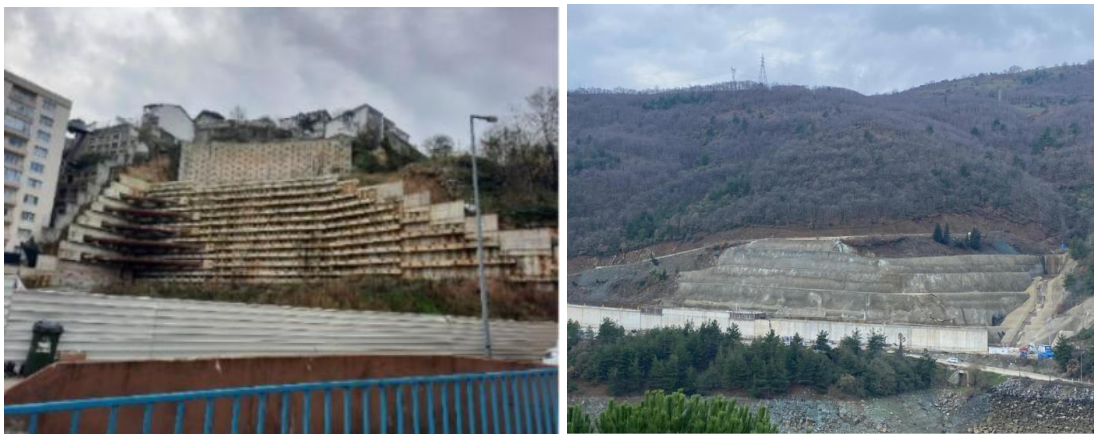
Malzeme depolanması, özellikle dolgu alanları ve hafriyat birikimleriyle arazi şekillerinin belirgin biçimde değişmesine neden olmaktadır. Maden işletmelerinden çıkan atıkların yığılması, yol ve yapı inşaatlarında kullanılan malzemelerin depolanması ile çöp depolama sahaları, topoğrafya üzerinde düzensiz biçimli yeni şekiller oluşturabilmektedir (Resim 2).



Resim 2. Maden alanından çıkarılan hafriyatın üst üste biriktirilmesiyle oluşan tepeler.

3.1.3. Karma Değişiklikler

Bursa'da Nilüfer ve Osmangazi ilçelerinde gözlenen hızlı kentleşme, arazi kullanımını önemli ölçüde değiştirmiştir. Kentleşme süreciyle birlikte artan konut, yol, kanal ve altyapı projeleri, yüzey suyunun akış düzenini değiştirmektedir. Bu ölçekteki karma antropojenik değişimler hem insan yaşamını hem de doğal ekosistemleri doğrudan etkilemektedir (Resim 3).



Resim 3. Bursa Çekirge İntam Bölgesi istinat duvarı (sol), Doğancı Barajı yolu üzerindeki teraslama (sağ).



Resim 4. Bursa-Keles ilçesi yol genişletme çalışması (sol), Doğancı Tüneli yapım çalışması (2024) (sağ),

Örneğin, 2004 yılına ait uydu görüntülerinde Nilüfer Barajı'nın bulunduğu alanda herhangi bir inşaat faaliyeti görülmemektedir. Ancak 2005 yılı görüntülerinde baraj inşaatının başladığı ve sahada küçük ölçekli antropojenik etkilerin ortaya çıktığı gözlenmektedir. 2011 yılına gelindiğinde ise barajın tamamlanması ve su tutmaya başlamasıyla baraj gerisinde yapay bir göl oluşmuş; böylece akarsu için yeni bir taban seviyesi belirlenmiştir. Bu durum, akarsu sisteminde erozyon, aşındırma ve biriktirme süreçlerinin yeniden şekillenmesine yol açarak bölgedeki jeomorfolojik dinamiklerde önemli değişimlere neden olmuştur (Şekil 2).



Şekil 2. Nilüfer barajının bulunduğu topografyanın yıllara göre değişimi. (2004-2005-2011)

3.3. Bursa Merkez İlçeleri ile Keles İlçesi'nde Antropojenik Jeomorfolojik Etki Oranının Analizi

Bu çalışmada, Bursa'nın merkez ilçeleri ile Keles ilçesinde antropojenik etkinin düzeyini belirlemek amacıyla Nir'in (1983) geliştirdiği Potansiyel Antropojenik Jeomorfoloji İndeksi (PAJİ) kullanılmıştır. İndeksin hesaplanmasında Köppen–Geiger iklim sınıflandırmasına göre belirlenen iklim tipi ve rölyef özellikleri gibi fiziksel değişkenler ile kentleşme oranı ve okur-yazar oranı gibi sosyo-ekonomik faktörler değerlendirilmiştir.

PAJİ değerleri 0–1 arasında olup; 0–0,25 düşük, 0,25–0,50 orta, 0,50–0,75 yüksek ve 0,75–1 arası çok yüksek antropojenik tehdit düzeyini ifade etmektedir (Nir, 1983; Uncu & Karakoca, 2021). Bursa merkez ilçelerinde hesaplanan 0,30 değeri, antropojenik etkinin orta düzeyde olduğunu ve uygun koruma önlemleriyle kontrol edilebileceğini göstermektedir. Buna karşılık, Keles ilçesinde elde edilen 0,52 değeri antropojenik etkinin yüksek düzeyde olduğunu ve çevresel etkilerin daha belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle yükseltinin arttığı alanlarda ulaşım, tarım ve taş ocağı faaliyetlerinin topografya üzerinde önemli değişikliklere yol açmasından kaynaklanmaktadır.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma, Bursa'nın merkez ilçeleri olan Osmangazi, Nilüfer, Yıldırım, Gürsu ve Kestel ile Keles ilçesinde antropojenik jeomorfolojik süreçlerin niteliğini ve mekânsal dağılışını incelemektedir. Çalışmada elde edilen bulgular, insan faaliyetlerinin tarihsel süreç boyunca giderek artan bir yoğunlukla jeomorfolojik birimlere müdahale ettiğini ve bu müdahalelerin arazi şekillerinin doğal gelişim seyrini belirgin şekilde değiştirdiğini göstermektedir. Özellikle taş ve maden ocakları, yerleşim alanları, ulaşım altyapıları, rekreasyon ve tarım faaliyetleri üzerinden gerçekleşen müdahaleler, yüzey morfolojisinde kalıcı değişiklikler oluşturmakta ve potansiyel riskleri artırmaktadır.

Nir'in (1983) Potansiyel Antropojenik Değişim İndeksi (PAJİ) kullanılarak yapılan değerlendirmede, Bursa merkez ilçelerinde 0,30, Keles ilçesinde ise 0,52 değerinin elde edilmesi, antropojenik baskının özellikle kırsal ve Keles ilçesinde daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Merkez ilçelerde antropojenik etkinin en yoğun olduğu alanın Osmangazi ilçesi olması; nüfus yoğunluğu, yapılaşmanın kapsamı ve yerleşim alanlarının genişliği ile doğrudan ilişkilidir.

Antropojenik jeomorfolojik süreçlerin yönetilmesi ve olası risklerin azaltılması için bazı önlemler önerilmektedir. İlk olarak, antropojenik şekillerin bilimsel olarak tanımlanması, sınıflandırılması ve standart bir çerçevede değerlendirilmesi gereklidir. Böylece insan etkisinin arazi üzerindeki baskısı nicel ve nitel olarak takip edilebilir ve etkin koruma stratejileri geliştirilebilir. Daha sonra özellikle taş ve maden ocaklarının kontrolsüz işletilmesi yamaç stabilitesini bozduğundan dolayı bu alanlara kota uygulanmalı; teraslama ve kademeli kazı teknikleri zorunlu tutulmalıdır. Son olarak faaliyeti sona eren sahaların ekolojik ve toplumsal amaçlar doğrultusunda rehabilite edilmesi gerekmektedir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, sorumlu yazarın yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.

KAYNAKLAR

Alkan, A., (2008). Van Gölü Güneydoğu Kıyılarında Gevaş ve Deveboynu Yarımadası Kıyı Kesiminde Antropojen Faaliyetlerin Rölyefe Etkisi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Van.

Cooke, R.U., Brunsden, D., Doornkamp. J.C. (1982). Urban Geomorphology in Drylands. Oxford University Press

Ertek, T. A., & Erginal, A. E. (2006). Anthropogenetically triggered landslide factors of the varyant land slide are at Büyükçekmece. NW Turkey, Zeitschrift für Geomorphologie, 50(2), 177-191.

Ertek, T. A. (2017). Antropojenik Jeomorfoloji: Konusu, Kökeni ve Amacı. Türk Coğrafya Dergisi, 69, 69-79

Erkal, A. (2018). Körfez ilçesinde (Kocaeli) antropojeomorfolojik araştırmalar (Yayınlanmamış yüksek lisans tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bilecik.

Goudie A. (2006). The Human Impact on the Natural Environment, Past, Present and Future. Blackwell, Oxford.

Nir, D. (1983). Man, A Geomorphological agent: an introduction to anthropic geomorphology. Keter Publishing House.

Özşahin, E. (2013). Asi Nehri Deltasının (Hatay) Antropojenik Jeomorfolojisi. (Ed. Ertuğ Öner) Profesör Doktor İlhan Kayan'a Armağan, Ege Üniversitesi Yayınları Edebiyat Fakültesi Yayın No 181, İzmir.

Szabo, J. (2010). Anthropogenic geomorphology: Subject and sys tem. In Szabo, J., David, L., and Loczy, D. (Eds.). Anthropogenic geomorphology: A guide to man-made landforms. 3-10, Sprin ger.

Şerifaki, E. (2006), İzmir Körfezi Örneğinde Antropojenik Etkiler ve Sonuçları Üzerine Araştırmalar, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, İzmir.

Uncu, L., & Karakoca, E. (2021). Antropo-jeomorfolojik bir yaklaşımla Bilecik (Merkez ilçe) taş ocaklarının mekânsal ve zamansal değişimi, 77, 119-130.

Uzun, M. (2021), Gölcük Ve Karamürsel'de (Kocaeli) Antropojenik Kökenli Jeomorfolojik Değişimlerin Potansiyel Risk Analizi, Marmara Üniversitesi, Coğrafya Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.

YALIN İYİLEŞTİRME UYGULAMALARI (5S-KAİZEN) TABANLI MAKE OR BUY STRATEJİSİNE ETKİSİ: SAVUNMA SANAYİNDE ÇOK KRİTERLİ BİR MODEL

ÖZGÜR ERDEM
Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
ozgurerdem77@gmail.com, ORCID: 0009-0003-1620-1384

Dr. Öğr. Üyesi GÖZDE ÖNDER UZUN
Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
gonder@baskent.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7527-0310

Özet

Savunma sanayinde artan rekabet, maliyet baskıları ve teslimat sürelerinin kritik önemi, işletmeleri yalın üretim prensiplerine dayalı olarak süreçlerini yeniden yapılandırmaya yönlendirmektedir. Bu bağlamda, 5S ve Kaizen gibi yalın iyileştirme yöntemleri hem üretim hattının verimliliğini artırmakta hem de işletmelerin stratejik make-or-buy (üretim–satın alma) kararlarını doğrudan etkilemektedir. Üretimin iç kaynaklarla mı yoksa tedarik yoluyla mı karşılanacağı, savunma sanayinde operasyonel esneklik, kalite güvenilirliği, hata oranları, standardizasyon ve tedarik zinciri uyumu gibi çok boyutlu kriterlere bağlı olarak şekillenmektedir. Bu araştırmada yalın iyileştirme uygulamalarının (5S ve Kaizen) make-or-buy stratejisi üzerindeki etkisini belirlemek ve savunma sanayi için bütüncül birçok kriterli değerlendirme modeli geliştirmesi amaçlanmaktadır. Araştırma kapsamında, yalın üretim yaklaşımının belirleyici performans göstergeleri esas alınarak altı kriterden oluşan özgün bir değerlendirme yapısı oluşturulmuş ve hem iç üretim (make) hem de dış tedarik (buy) senaryoları bu çerçevede analiz edilmiştir. Araştırmanın yönteminde çok kriterli karar verme teknikleri entegrasyonuna yer verilmiştir. Öncelikle Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ile kriterlerin göreli önem ağırlıkları belirlenmiş, ardından bu ağırlıklar TOPSIS ve MOORA yöntemlerine entegre edilerek alternatiflerin yalın performans göstergeleri açısından sıralaması yapılmıştır. AHP sayesinde kriterlerin tutarlı biçimde önceliklendirildiği, TOPSIS ile alternatiflerin pozitif ideale yakınlıklarının ölçüldüğü ve MOORA ile net fayda oranlarının hesaplandığı bütünleşik bir model ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, yalın iyileştirme odaklı senaryolarda iç üretimin (make) dış alıma (buy) göre daha yüksek performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle iş akışı verimliliği, hata azaltma potansiyeli ve standardizasyon gibi 5S–Kaizen odaklı kriterlerde iç üretim seçeneklerinin belirgin biçimde öne çıktığı görülmüştür. Buna karşın dış alım senaryoları tedarik süreci uyumu açısından avantaj sunsa da, yalınlık göstergelerinde aynı düzeyi yakalayamamıştır.

Anahtar Kelimeler: 5S, Kaizen, Yalın Üretim, Make-buy.

THE IMPACT OF LEAN IMPROVEMENT PRACTICES (5S-KAIZEN) ON MAKE OR BUY STRATEGY: A MULTICRITERIA MODEL IN THE DEFENSE INDUSTRY

Abstract

Increasing competition in the defense industry, cost pressures, and the critical importance of delivery times are driving companies to restructure their processes based on lean manufacturing principles. In this context, lean improvement methods such as 5S and Kaizen both increase the efficiency of the production line and directly influence companies' strategic make-or-buy decisions. Whether production is met with internal resources or through procurement is shaped by multidimensional criteria in the defense industry, such as operational flexibility, quality reliability, error rates, standardization, and supply chain alignment. This study aims to determine the impact of lean improvement practices (5S and Kaizen) on the make-or-buy strategy and to develop a comprehensive multi-criteria evaluation model for the defense industry. Within the scope of the research, a unique evaluation structure consisting of six criteria was created based on the key performance indicators of the lean production approach, and both internal production (make) and

external procurement (buy) scenarios were analyzed within this framework. The research methodology included the integration of multi-criteria decision-making techniques. First, the relative importance weights of the criteria were determined using the Analytic Hierarchy Process (AHP), and then these weights were integrated into the TOPSIS and MOORA methods to rank the alternatives in terms of their simple performance indicators. Thanks to AHP, a consistent prioritization of criteria was achieved; TOPSIS measured the proximity of alternatives to the positive ideal; and MOORA calculated the net benefit ratios, resulting in an integrated model. The findings reveal that in lean improvement-focused scenarios, in-house production (make) outperforms external procurement (buy). In particular, in-house production options clearly stand out in criteria focused on 5S–Kaizen, such as workflow efficiency, error reduction potential, and standardization. In contrast, although outsourcing scenarios offer advantages in terms of supply chain alignment, they fail to achieve the same level in lean indicators.

Keywords: 5S, Kaizen, Lean Manufacturing, Make-buy.

1. GİRİŞ

Savunma sanayii, ülkelerin güvenliğini sağlamaya yönelik stratejik ürün ve sistemlerin üretimi ile tedarikini gerçekleştiren ve bu yönüyle ulusal bağımsızlık açısından kritik önem taşıyan bir sektörü oluşturmaktadır (Yılmaztürk, 2023). Teknolojik gelişmeler ile jeopolitik dinamiklerdeki değişimler, savunma sanayiinin ülkelerin ekonomik ve askeri kapasitesi üzerinde doğrudan belirleyici olmasına neden olmaktadır. Artan ürün çeşitliliği, karmaşık tedarik süreçleri ve yoğun rekabet ortamı, savunma sanayii işletmelerinin etkin karar verme mekanizmalarına duyduğu ihtiyacı artırmaktadır (Bayram, 2020). Savunma sanayii işletmeleri, geleneksel işletmelerden farklı olarak yalnızca kâr maksimizasyonunu öncelememekte; bunun yerine kritik sistemlerin güvenilirlik, kalite, dayanıklılık, teslim süresi doğruluğu ve operasyonel etkinlik gibi unsurlarına öncelik vermektedir (Çıkmak vd., 2020). Bu nedenle sektördeki tüm üretim, denetim ve tedarik süreçleri devlet tarafından sıkı biçimde kontrol edilmekte ve sertifikasyon süreçleri zorunlu tutulmaktadır. Aynı zamanda savunma sanayii firmaları, ana yüklenici olarak yürüttükleri projelerde yan sanayi ve tedarikçi ekosisteminin gelişimine doğrudan katkı sağlamaktadır (Akdeve, 2012). Bu çerçevede, savunma sanayiinde make-or-buy kararları, işletmelerin rekabet gücünü, maliyetlerini, teslimat performansını ve operasyonel sürekliliğini etkileyen temel stratejik kararlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Firmalar, bir bileşeni kendi bünyesinde üretme (make) ya da dış tedarik yoluyla satın alma (buy) seçenekleri arasında seçim yaparken; maliyet, kalite, zamanlama, kapasite yeterliliği, teknik uzmanlık düzeyi ve ERP sistemlerinin sağladığı tahmin gücü gibi çok boyutlu kriterleri dikkate almak zorundadır. Özellikle teslim süresi sapmalarının doğru tahmin edilebilmesi, tedarik planlaması açısından belirleyici bir rol oynamaktadır (Nebati, 2024).

Savunma sanayi işletmelerinin kalite yönetim sistemleri (KYS), müşterinin—çoğunlukla devletin—beklentilerinin doğru anlaşılmasını ve süreçlerin buna uygun şekilde yürütülmesini sağlamaktadır. Bu sistem, ürünlerin güvenilir, standartlara uygun ve izlenebilir biçimde üretilmesine olanak tanımaktadır. Devletin gerçekleştirdiği sertifikasyon ve müşteri denetimleri, üretimin her aşamasında kalite güvencesinin korunmasını amaçlamaktadır (Demir ve Adem, 2025).

Tedarik zincirinin etkin yönetilmesi, savunma sanayiinde kritik öneme sahiptir. Çünkü sektördeki karar vericiler, üretim ve operasyonların kesintisiz sürdürülebilmesi için tedarikçilerin kapasite, kalite, teslimat doğruluğu ve teknik yeterlilik yönünden güvenilir olmasını beklemektedir. Bu nedenle tedarikçi seçimi, çok sayıda alternatif ve çok boyutlu kriterlerden oluşan karmaşık bir karar problemidir. Bilimsel yöntemlerin kullanılması, karar vericilerin daha nesnel, karşılaştırılabilir ve doğrulanabilir sonuçlara ulaşmasına yardımcı olmaktadır (Canlı ve Aplak, 2016).

Bu kapsamda, çalışmamızda savunma sanayinde yürütülen make-or-buy karar sürecini desteklemek amacıyla tedarikçi performansları Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve MOORA gibi çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak değerlendirilmekte; aynı zamanda ERP sisteminin tahmin gücü, planlanan ve gerçekleşen teslim süreleri arasındaki sapmalar üzerinden analiz edilmektedir. Bu analiz sayesinde, hangi

bileşenin iç üretim için uygun olduğu, hangisinin ise dış tedarik yoluyla daha etkin karşılandığı belirlenmektedir. Elde edilen sonuçlar, savunma sanayii işletmelerinin tedarik zinciri stratejilerini güçlendirmelerine ve make-or-buy kararlarını daha sağlam temellere dayandırmalarına katkı sağlamaktadır. Araştırmaya yönelik literatür taraması aşağıda yer alan Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Literatür Taraması

Yazar (Yayın Yılı)	**Uygulama Alanı**	**Yöntem**
Saaty (2008)	Çok kriterli karar verme problemleri, soyut ve somut kriterlerin birlikte değerlendirilmesi	Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)
Rámík (2020)	İkili karşılaştırmalar ve karar verme süreçlerinin yeniden değerlendirilmesi	AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci)
Vásquez vd. (2022)	Hisse senedi portföy seçimi, risk–getiri dengesi, finansal piyasada yatırım kararları	AHP – TOPSIS Hibrit Çok Kriterli Karar Verme (MCDA)
Demir & Adem (2025)	Savunma sanayinde tedarikçilerin kalite yönetim sistemi olgunluk düzeyinin değerlendirilmesi	AHP, ARAS, EDAS (Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri)
Serrano vd. (2018)	Make-or-buy kararlarının belirleyicileri, faktörleri ve teorik temelleri üzerine kapsamlı literatür incelemesi	Sistematik literatür taraması (1982–2017 arası 99 makale; ProQuest, Scopus, Web of Science)
Liu vd. (2020)	Endüstride karar-verme problemleri (tedarikçi seçimi, makine seçimi vb.)	FAHP (Fuzzy AHP) literatür taraması
Mantel vd. (2006)	Tedarik yöneticilerinin "make versus buy" değerlendirmesinde davranışsal karar-verme faktörleri (çekirdek yetkinlik, stratejik savunmasızlık, bilgi kaynağı formalliği)	Kontrollü deneysel anket çalışması, senaryo tabanlı, ANOVA ve t-test analizleri
Arora & Kumar (2022)	Farklı sektörlerde make-or-buy kararlarının incelenmesi (imalat, otomotiv, tekstil, yiyecek, konaklama)	Ampirik çalışma; kırılma-eşik analizi (break-even), ekonomik analiz ve literatürden elde edilen kriterler üzerinde uygulama

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Bu çalışmanın amacı, yalın iyileştirme uygulamalarının – özellikle 5S ve Kaizen'in – savunma sanayindeki make-or-buy stratejisine etkisini inceleyen bütüncül bir karar modeli geliştirmektir. Araştırmada yalın üretim yaklaşımının belirleyici performans göstergeleri kriter olarak ele alınmış ve bu değişkenler doğrultusunda farklı iç üretim ve dış tedarik senaryoları değerlendirilmiştir. Böylece, savunma sanayiinde karmaşık karar süreçlerini desteklemek üzere hem teorik hem de uygulamalı bir çerçeve sunulması amaçlanmaktadır. Çalışmanın önemi, make-or-buy kararının yalın iyileştirme perspektifiyle ele alınarak alan yazında nispeten göz ardı edilen bir ilişkiyi ortaya koymasından kaynaklanmaktadır. 5S ve Kaizen uygulamalarının yalnızca operasyonel düzeni ve verimliliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda karar

vericilere üretim stratejilerini yeniden değerlendirme konusunda somut veriler sunabileceği gösterilmiştir. Bu yönüyle çalışma, savunma sanayiinde süreçlerin yalınlaştırılması ve stratejik kararların daha isabetli biçimde alınması için akademik ve pratik açıdan önemli bir katkı sağlamaktadır.

2.2. Araştırma Verileri ve Değişkenler

Bu araştırmada, savunma sanayinde make-or-buy kararını yalın iyileştirme perspektifiyle analiz edebilmek amacıyla çok kriterli bir değerlendirme yapısı oluşturulmuştur. Veri seti, yalın üretim yaklaşımının temel göstergeleri ile savunma sanayine özgü operasyonel çıktıların bir araya getirilmesiyle modellenmiştir. Araştırmada değerlendirilen değişkenler, hem iç üretim (make) hem de dış tedarik (buy) senaryolarını karşılaştırmaya olanak sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. Kriterler doğrudan yalın üretim yaklaşımından türetilmiş olup, süreç verimliliği, standartlaşma seviyesi, hata azaltma kapasitesi, üretim esnekliği, çeviklik ve tedarik uyumu gibi performans göstergelerini kapsamaktadır. Araştırmada kullanılan değişkenler aşağıda yer alan Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Araştırmada Kullanılan Değişken Açıklamaları

Değişken Kodu	Değişken Adı	Tanım
K1	İş Akışı Verimliliği	Yalın üretim kapsamında süreç akışının kesintisizliğini, Muda–Muri–Mura kaynaklı kayıpların azaltılmasını ve üretim hattının akış hızını ifade eder.
K2	Standartlaştırma Düzeyi	5S uygulamalarının (Seiri, Seiton, Seiketsu) süreç tutarlılığına, çalışma alanı düzenine ve operasyonel standardizasyona sağladığı katkıyı temsil eder.
K3	Hata ve Sapma Azaltma Potansiyeli	Kaizen yaklaşımı doğrultusunda hata kök nedenlerinin sistematik olarak ortadan kaldırılması, kalite sapmalarının azaltılması ve sürekli iyileştirme kapasitesini yansıtır.
K4	Operasyonel Esneklik	Üretim sisteminin değişen talep, teknik gereksinim ve varyantlara hızlı ve etkin biçimde uyum sağlayabilme kabiliyetini ifade eder.
K5	Çeviklik ve Tepki Süresi	Savunma sanayisinde kritik olan teslim sürelerine uyum, ani değişikliklere verilen tepki hızı ve üretim süreçlerindeki reaksiyon kapasitesini gösterir.
K6	Tedarik Süreci Uyum Yeteneği	İç üretim ve dış tedarik süreçlerinin entegrasyonu, tedarikçi performansı, lojistik uyum ve malzeme akış güvenilirliğini temsil eder.

2.3. Make–Buy Senaryoları

Bu araştırmada, savunma sanayinde iç üretim (make) ve dış tedarik (buy) seçeneklerinin yalın üretim perspektifiyle karşılaştırılabilmesi amacıyla altı farklı alternatif tanımlanmıştır. Alternatifler, sektörde yaygın kullanılan üç temel alt sistem üzerinden modellenmiş olup her alt sistem için hem iç üretim hem de dış alım senaryosu ayrı bir değişken olarak analize dahil edilmiştir. Böylece üretim kararının yalın iyileştirme göstergelerine göre nasıl farklılık gösterebileceği sistematik biçimde değerlendirilmiştir.

Çalışmada ele alınan alternatifler aşağıdaki gibidir:

- İç Üretim (Make) Alternatifleri
- M1 – Radar Alt Sistemi (İç Üretim): Radar birimlerinin kurum bünyesinde, yalın üretim prensipleri doğrultusunda üretilmesi.

- M2 – Motor Alt Sistemi (İç Üretim): Motor bileşenlerinin şirket içerisinde, 5S ve Kaizen destekli üretim süreçleriyle gerçekleştirilmesi.
- M3 – Optik/Hedefleme Modülü (İç Üretim): Optik ve hedefleme birimlerinin işletme içerisinde üretilmesi ve süreç iyileştirme uygulamalarından yararlanılması.
- Dış Tedarik (Buy) Alternatifleri
- B1 – Radar Alt Sistemi (Dış Alım): Radar birimlerinin dış tedarikçilerden sağlanması.
- B2 – Motor Alt Sistemi (Dış Alım): Motorların dış kaynak kullanımı ile temin edilmesi.
- B3 – Optik/Hedefleme Modülü (Dış Alım): Optik ve hedefleme birimlerinin dış tedarik kanalları üzerinden karşılanması.

Bu alternatiflerin çalışmaya dahil edilmesindeki temel amaç, yalın iyileştirme uygulamalarının iç üretim süreçlerinde sağladığı avantajların dış tedarik seçeneğine göre hangi boyutlarda farklılaştığını ortaya koymaktır. Böylece make-or-buy kararı, yalnızca maliyet ve kapasite gibi geleneksel göstergelerle değil, aynı zamanda 5S ve Kaizen'den etkilenen yalın üretim değişkenleriyle birlikte bütüncül bir perspektiften değerlendirilmiştir. Her alternatif, 6 yalın üretim değişkeni için 0–1 ölçeğinde normalize edilmiş performans değerleriyle temsil edilir. Bu değerler sektör raporları, üretim uzmanı görüşleri, mevcut süreç analizleri ve yalın performans göstergeleri doğrultusunda oluşturulmuştur.

Tablo 2. Make–Buy Alternatiflerine Ait Veri Seti

Alternatif	**K1**	**K2**	**K3**	**K4**	**K5**	**K6**
M1 – Radar Make	0.82	0.88	0.79	0.74	0.81	0.69
M2 – Motor Make	0.84	0.91	0.85	0.77	0.83	0.72
M3 – Optik Make	0.79	0.86	0.82	0.76	0.78	0.67
B1 – Radar Buy	0.56	0.61	0.58	0.65	0.69	0.81
B2 – Motor Buy	0.52	0.59	0.55	0.62	0.66	0.84
B3 – Optik Buy	0.58	0.63	0.57	0.64	0.70	0.79

Tablo 2'de yer alan veriler, çalışmada uygulanacak AHP, TOPSIS ve MOORA yöntemlerine temel oluşturmaktadır. İç üretim alternatiflerinin özellikle iş akışı verimliliği, standartlaştırma ve hata azaltma değişkenlerinde daha yüksek performans sergilediği; buna karşın dış alım alternatiflerinin tedarik süreci uyum yeteneğinde daha güçlü olduğu görülmektedir.

3. BULGULAR

3.1.AHP

Savunma sanayinde make-or-buy kararının yalın üretim perspektifiyle değerlendirilebilmesi için çalışmada ele alınan altı değişkenin göreli önem düzeylerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, 5S ve Kaizen uygulamalarının üretim süreçleri üzerindeki etkilerini temsil eden değişkenlerin birbirlerine göre önem sıralamasını belirlemek amacıyla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi kullanılmıştır. AHP, karar vericilerin uzmanlık ve deneyimlerine dayalı ikili karşılaştırmalar yaparak değişkenlerin ağırlıklarını hesaplamayı mümkün kılmakta; böylece çok boyutlu yapıya sahip yalın üretim faktörlerinin sistematik biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi, yalın iyileştirme tekniklerinin savunma sanayi üretim süreçlerindeki etkisini ölçmeye yönelik olarak yapılandırılmıştır. AHP yöntemiyle yapılan hesaplamalar sonucunda değişkenlere ait ağırlık değerleri Tablo 3'te sunulmaktadır.

Tablo 3. AHP ile Elde Edilen Değişken Ağırlıkları

Değişken Kodu	Değişken Adı	Ağırlık (w_i)
K2	Standartlaştırma Düzeyi	0.26
K3	Hata ve Sapma Azaltma Potansiyeli	0.22
K1	İş Akışı Verimliliği	0.20
K4	Operasyonel Esneklik	0.14
K5	Çeviklik ve Tepki Süresi	0.11
K6	Tedarik Süreci Uyum Yeteneği	0.07

Tablo 3 incelendiğinde, değişkenler arasında en yüksek ağırlığın standartlaştırma düzeyine (K2) ait olduğu, bunu hata ve sapma azaltma potansiyelinin (K3) takip ettiği görülmektedir. İş akışı verimliliğinin (K1) üçüncü sırada yer aldığı, operasyonel esneklik (K4) ile çeviklik ve tepki süresinin (K5) orta düzeyde önem taşıdığı anlaşılmaktadır. Tedarik süreci uyum yeteneğinin (K6) ise diğer değişkenlere kıyasla daha düşük bir ağırlık değerine sahip olduğu dikkat çekmektedir. Tutarlılık oranının kabul edilebilir sınırın altında olması, yapılan ikili karşılaştırmaların tutarlı olduğunu göstermektedir.

3.2. TOPSIS

Make-or-buy alternatiflerinin yalın üretim değişkenleri açısından bütüncül olarak değerlendirilmesi amacıyla Analitik Hiyerarşi Süreci'nden (AHP) elde edilen ağırlıklar, TOPSIS yöntemi ile alternatiflere uygulanmıştır. TOPSIS, her alternatifin pozitif ideale olan yakınlığı ve negatif idealden olan uzaklığı üzerinden bir performans skoru üreten çok kriterli karar verme yaklaşımıdır. Bu yöntem, yalın üretim uygulamalarının sağladığı performans farkını objektif olarak karşılaştırmaya uygun bir yapı sunduğundan savunma sanayindeki değerlendirme için tercih edilmiştir. Analizde ilk olarak karar matrisi normalize edilmiş, ardından AHP ağırlıkları ile çarpılarak ağırlıklı karar matrisi elde edilmiştir. Pozitif ideal çözüm, her bir değişken için en yüksek performans değerlerini; negatif ideal çözüm ise en düşük değerleri temsil etmektedir. Bu değerler kullanılarak her alternatifin ideal çözümlere olan uzaklıkları hesaplanmış ve nihai yakınlık katsayıları oluşturulmuştur. TOPSIS yöntemi sonucunda elde edilen performans skorları Tablo 4'te sunulmaktadır.

Tablo 4. TOPSIS Analizi Sonuçları

Alternatif	Pozitif İdeal Uzaklık (S^+)	Negatif İdeal Uzaklık (S^-)	Yakınlık Katsayısı (C_i)	Sıra
M2	0.118	0.566	0.828	1
M1	0.142	0.531	0.789	2
M3	0.165	0.492	0.748	3
B1	0.348	0.281	0.447	4
B3	0.362	0.259	0.417	5
B2	0.384	0.236	0.381	6

Tablo 4'e göre, iç üretim senaryolarının (M1, M2, M3) pozitif ideale daha yakın değerler aldığı ve yakınlık katsayılarının dış tedarik senaryolarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Motorun iç üretim alternatifi (M2) en yüksek performans skoruna sahip olup ideal çözüme en yakın alternatif konumundadır. Radar (M1) ve optik modülün (M3) iç üretim seçenekleri sırasıyla ikinci ve üçüncü sırada yer almaktadır. Dış alım alternatifleri (B1, B2, B3) ise negatif ideale daha yakın değerlere sahip olup sıralamada alt sıralarda bulunmaktadır.

3.3. MOORA

Make-or-buy alternatiflerinin yalın üretim değişkenleri açısından performanslarının karşılaştırılmasında kullanılan bir diğer yöntem MOORA'dır. MOORA, fayda ve maliyet türündeki değişkenleri aynı model içinde değerlendirebilmesi ve karar verme sürecine doğrudan bir net fayda oranı sağlaması nedeniyle savunma sanayi uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Çalışmada, 5S ve Kaizen odaklı yalınlık göstergeleri fayda değişkenleri olarak ele alınmış; maliyet yönlü değişken bulunmadığından tüm göstergeler pozitif fayda kriteri şeklinde değerlendirilmiştir.

MOORA yönteminde ilk aşamada karar matrisi normalize edilmiş, ardından AHP'den elde edilen ağırlıklar kullanılarak her alternatif için fayda toplamı hesaplanmıştır. Bu değerler üzerinden alternatiflerin net fayda oranları oluşturulmuş ve sıralama belirlenmiştir. MOORA'nın sağladığı doğrudan karşılaştırma yapısı, özellikle yalın üretim uygulamalarının üretim senaryoları üzerindeki etkisini net biçimde izlemeyi mümkün kılmıştır.

Analiz sonucunda elde edilen MOORA değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. MOORA Analizi Sonuçları

Alternatif	**Fayda Toplamı**	**Net Fayda Oranı (y_i)**	**Sıra**
M2	1.745	1.745	1
M1	1.701	1.701	2
M3	1.648	1.648	3
B1	1.266	1.266	4
B3	1.255	1.255	5
B2	1.232	1.232	6

Tablo 5 incelendiğinde iç üretim alternatiflerinin (M1, M2, M3) daha yüksek net fayda oranlarına sahip olduğu görülmektedir. Motorun iç üretim alternatifi (M2), tüm değişkenler açısından en yüksek toplam faydayı sağlayarak birinci sırada yer almaktadır. Radar ve optik sistemlerin iç üretim seçeneklerinin de benzer şekilde yüksek performans gösterdiği anlaşılmaktadır. Dış tedarik alternatiflerinin (B1, B2, B3) net fayda değerleri daha düşük olup sıralamada alt basamaklarda yer almaktadır.

4. SONUÇ

Araştırma, savunma sanayinde make-or-buy kararının yalın iyileştirme perspektifiyle değerlendirilmesine yönelik bütüncül bir model sunmuştur. 5S ve Kaizen uygulamalarının üretim süreçlerindeki etkilerini temsil eden altı temel değişken AHP yöntemiyle önceliklendirilmiş; ardından TOPSIS ve MOORA yöntemleri kullanılarak iç üretim ve dış tedarik senaryolarının yalın performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, yalın üretim uygulamalarının make-or-buy stratejisi üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. AHP analizine göre, standartlaştırma düzeyi, hata azaltma potansiyeli ve iş akışı verimliliği en yüksek öneme sahip değişkenler olarak öne çıkmıştır. TOPSIS ve MOORA analizlerinin ortak bulguları,

iç üretim alternatiflerinin pozitif ideale daha yakın değerlere sahip olduğunu ve net fayda açısından dış tedarik seçeneklerine kıyasla daha yüksek performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle motor, radar ve optik sistemlerde iç üretim senaryolarının ideal çözüme yakınlığı belirgin şekilde daha yüksek bulunmuştur.

Analizlerin bütüncül değerlendirmesi, savunma sanayinde yalın üretim uygulamalarının sistematik biçimde yürütüldüğü süreçlerde make seçeneğinin daha avantajlı olduğu sonucunu desteklemektedir. Standartlaştırılmış iş akışları, düşük hata oranları, iyileştirilmiş ergonomi, hızlı reaksiyon kabiliyeti ve süreç içi görünürlüğün artırılması, iç üretimi yalın performans açısından daha üstün bir konuma taşımaktadır. Buna karşın dış tedarik alternatiflerinin özellikle tedarik uyumu gibi belirli alanlarda avantaj sağladığı görülmekle birlikte, yalın üretimin temel göstergeleri açısından iç üretimin performansını yakalayamadığı anlaşılmaktadır. Bu araştırma, make-or-buy kararının yalnızca maliyet ya da kapasite temelli geleneksel yaklaşımlarla değil, işletmenin yalınlık düzeyi ve iyileştirme kapasitesi dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. 5S ve Kaizen uygulamalarının analitik bir modele entegre edilmesi, savunma sanayinde karar vericilere daha rasyonel, ölçülebilir ve sürdürülebilir bir yaklaşım sunmakta; aynı zamanda çok kriterli karar verme tekniklerinin sektörel uygulamalar açısından geçerliliğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, yalın üretim ve tedarik stratejilerinin entegrasyonuna yönelik literatüre ve uygulayıcılara bir katkı sağlamaktadır.

5. TARTIŞMA

Araştırmada savunma sanayinde make-or-buy kararının 5S ve Kaizen temelli yalın iyileştirme uygulamaları bağlamında değerlendirilmesi amaçlanmış ve AHP, TOPSIS ile MOORA sonuçları bütüncül biçimde incelenmiştir. Bulguların ortak noktası, yalın üretim pratiklerinin sistematik biçimde uygulandığı senaryolarda iç üretimin dış tedarike göre daha yüksek performans gösterdiğidir. Bu durum, literatürde belirtilen "yalın üretim olgunluğunun üretim kararlarını doğrudan etkilediği" görüşüyle örtüşmektedir.

AHP bulgularında standartlaştırma düzeyinin ve hata azaltma potansiyelinin en önemli değişkenler arasında yer alması, 5S ve Kaizen uygulamalarının üretim stabilitesine sağladığı katkıyı doğrular niteliktedir. Süreçlerin standardizasyonu ve kalite sapmalarının azaltılması, savunma sanayinde kritik nitelikteki alt sistemlerde operasyonel riskleri azaltmakta ve daha güvenilir bir üretim altyapısı oluşturmaktadır. TOPSIS ve MOORA sonuçlarında iç üretim senaryolarının pozitif ideale daha yakın ve net fayda değerlerinin daha yüksek olması, yalın iyileştirme uygulamalarının doğrudan üretim performansına yansıdığını göstermektedir. Radar, motor ve optik modüller gibi karmaşık üretim gerektiren alt sistemlerde iç üretimin öne çıkması; bilgi birikiminin, süreç görünürlüğünün ve hızlı müdahale kabiliyetinin make seçeneğinde daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca dış tedarik seçeneklerinin yalnızca tedarik uyumu bakımından nispeten güçlü görünmesi, savunma sanayinde tedarik zinciri karmaşıklığının make-or-buy kararında önemli bir değişken olduğunu göstermektedir. Ancak yalın üretim ölçütleri açısından bakıldığında dış alım alternatiflerinin genel performansının iç üretim kadar güçlü olmadığı anlaşılmaktadır. Savunma sanayinde yalın iyileştirme uygulamalarının yalnızca operasyonel verimlilik değil, aynı zamanda stratejik karar süreçleri üzerinde de etkili olduğunu göstermektedir. Standartlaşmanın, hata azaltmanın, akış verimliliğinin ve çevikliğin make-or-buy kararında belirleyici bir yapıda öne çıkması, yalın üretim kültürünün tedarik stratejileri ile bütünleşik değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

Akdeve, E. (2012). Savunma Sanayii Kümelenmesi: İşbirliği ve Rekabet. SMM.

Arora, M., & Kumar, A. (2022). *An empirical study on make-or-buy decision making*. International Journal of Education and Management Engineering, 12(1), 19-28.

Bayram, O. (2020). Savunma sanayinin gelişiminin ihracat-ithalat dengesi üzerindeki etkileri. *Güvenlik Stratejileri Dergisi*, *16*(33), 163-188.

Canlı, A. K., & Aplak, H. S. (2016). Belirsizlik içeren tedarik zinciri yönetimi karar süreçlerinde savunma sektörüne yönelik bir uygulama. *Güvenlik Stratejileri Dergisi*, *12*(24), 71-108.

Çıkmak, S., Üstündağ, A., & Ungan, M. C. (2020). Savunma sanayindeki bir işletmede tedarik zinciri risk azaltma stratejilerinin Bulanık DEMATEL Yöntemiyle analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *8*(3), 2005-2028.

Demir, Ö. N., & Adem, A. (2025). Savunma sanayinde kalite yönetim sistemi olgunluğunun çok kriterli karar verme yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi, 28*(1), 137-146,

Liu, Y., Eckert, C. M., & Earl, C. (2020). A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. *Expert systems with applications*, *161*, 113738.

Mantel, S. P., Tatikonda, M. V., & Liao, Y. (2006). Behavioral decision-making by supply managers in the make-versus-buy evaluation. *Journal of Operations Management, 24*(6), 822-838.

Medina Serrano, R., González Ramírez, M. R., & Gascó Gascó, J. L. (2018). *Should we make or buy? An update and review*. *European Research on Management and Business Economics, 24*(3), 137–148.

Nebati, E. E. (2024). Tedarik Zinciri Yönetiminde Kurumsal Kaynak Planlama Yazılımlarının Memnuniyet Düzeyinin Ölçülmesine Yönelik Bir Araştırma. *International Journal of Social and Humanities Sciences Research (JSHSR)*, *11*(105), 665-673.

Ramík, J. (2020). *Applications in Decision-Making: Analytic Hierarchy Process—AHP Revisited*. In *Pairwise Comparisons Method* (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 690, pp. 189-211). Springer.

Saaty, T. L. (2008). *Decision making with the analytic hierarchy process*. *International Journal of Services Sciences, 1*(1), 83–98.

Vásquez, J. A., Escobar, J. W., & Manotas, D. F. (2022). *AHP–TOPSIS methodology for stock portfolio investments*. *Risks, 10*(1), 4.

Yılmaztürk, A. (2023). Türkiye'de savunma sanayi sektörü ve ekonomi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi. *Enderun*, *7*(2), 139-165.

AUTOMATIC DETECTION OF EMERGENCY HAND GESTURES IN THE CONTEXT OF VIOLENCE AND COERCIVE CONTROL USING YOLO POSE MODELS

FERHAT ERDOĞAN
Sakarya University, Institute of Natural Sciences, Department of Information Systems Engineering
ferhaterdgn@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6095-6923

Assist. Prof. Dr. MUHAMMED KOTAN
Sakarya University, Faculty of Computer and Information Sciences, Department of Information Systems Engineering
mkotan@sakarya.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5218-8848

Abstract

This study presents a comparative evaluation of YOLOv8-pose and YOLO11-pose architectures for automated detection of emergency hand gestures employed in violence and coercive control contexts. Both nano (n) and medium (m) model variants were examined to assess performance scalability under computational constraints. All models were trained on the Hand-Keypoints dataset utilizing 21-keypoint annotations and subsequently evaluated on a custom dataset comprising 160 video samples. Performance evaluation employed overall accuracy, Macro F1-score, and class-specific F1-scores. YOLO11m-pose demonstrated superior performance across all evaluation criteria, achieving 86.8% overall accuracy and a Macro F1-score of 0.884. Class-specific performance yielded F1-scores of 0.861 for "Signal for Help" and 0.908 for "Need Police" gestures. These results establish YOLO11m-pose as the optimal architecture among tested models for real-time emergency gesture recognition in violence intervention systems.

Keywords: Pose estimation, YOLO, Emergency hand gestures, Signal for Help

1. INTRODUCTION

Gesture recognition has emerged as a pivotal subdomain within Computer Science and Human-Computer Interaction (HCI), evolving beyond simple hand movements to encompass a broad spectrum of dynamic human actions. While its applications span diverse sectors, the specialized domain of Help Gesture Recognition (HGR) is distinct in its focus on movements that convey immediate, critical information or emergency commands. HGR systems operate under a severe intolerance for failure; the consequences of misclassification can be detrimental in high-stakes scenarios such as remote medical monitoring or industrial safety signaling. However, current literature indicates that gesture recognition technologies still contend with limitations regarding accuracy, adaptability to diverse users, and environmental constraints (Shankar, M, Joseph, & Kumar, 2025). Addressing these shortcomings is essential for HGR systems, which demand exceptional reliability and low latency to ensure rapid and accurate third-party notification.

In specific environments characterized by violence, coercive control, or stalking, victims are frequently prevented from vocalizing requests for assistance. Accordingly, discrete and silent hand gestures have evolved into a pivotal communication channel. The Signal for Help, introduced by the Canadian Women's Foundation, has been widely adopted as a silent distress cue during camera-mediated interactions (Buccellato, Vacca, Azimi, De Sio, & Sterpone, 2025). Similarly, the Need Police gesture functions as a visual alarm designed to facilitate third-party notification of law enforcement agencies.

The advent of Deep Learning (DL) has fundamentally transformed this landscape, shifting the methodological focus from manual feature engineering to autonomous feature representation via Convolutional Neural Networks (CNNs) and Recurrent Neural Networks (RNNs) (Gunawan & Djamal, 2021; Prakash et al., 2020). A critical development in this evolution is also the skeletonization strategy, where frameworks like MediaPipe utilize optimized machine learning pipelines to extract standardized

skeletal coordinates (Li & Hsieh, 2025). By unifying keypoint regression and class prediction within a single detection head, modern architectures deliver inference speeds necessary for real-time edge processing.

The You Only Look Once (YOLO) framework is foundational for real-time Help Gesture Recognition (HGR), prioritized for its low latency and efficiency due to its single-stage architecture (Mujahid et al., 2021). In practice, YOLO models excel in three primary roles within this field. First, they perform rapid hand localization, defining the Region of Interest (ROI) for subsequent classification stages. Second, for static gestures, YOLO variants offer high end-to-end classification accuracy. Third, specialized models like YOLO-Pose move beyond bounding boxes to track real-time hand keypoints, enabling recognition of nuanced actions. When applied to dynamic (sequential) gestures, YOLO often serves as the crucial high-speed spatial feature extractor, feeding localized outputs into temporal models. YOLO variants have been successfully deployed for human pose estimation, occupational monitoring, sports analytics, and sign-language recognition (Pan et al., 2025; Cao, Lu, & Cao, 2024; Mujahid et al., 2021; Ding, Niu, Nie, & Zhu, 2024).

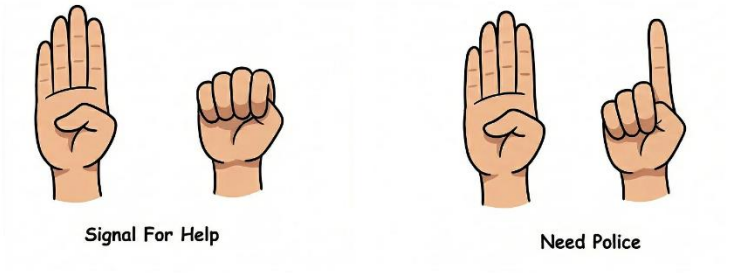


Figure 1. Schematic representation of the two emergency gestures evaluated in this study.

Despite these advancements, the deployment of HGR systems in unconstrained real-world environments remains challenging. While widely adopted architectures achieve high accuracy on standardized datasets, they often exhibit fragility when confronted with environmental variables such as fluctuating lighting, occlusion, and user distance (Oudah, Al-Naji, & Chahl, 2020; Tan, Lim, Chang, Lee, & Alqahtani, 2023). Furthermore, prior work has largely concentrated on alphabetic or basic gesture vocabularies, while studies devoted to emergency gestures remain limited.

To bridge this gap, this study presents an evaluation of the two help-seeking gestures illustrated in Figure 1. We specifically examine the scalability and robustness of the nano (n) and medium (m) variants of the YOLOv8 and YOLO11 pose architectures to determine the optimal balance between computational efficiency and detection reliability in violence intervention systems.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Dataset Details

The annotation schema employed in this study adheres to the Hand Keypoints Dataset specification, derived from collections such as the 11k-Hands (Afifi, 2019), Hand gestures (Giridhar, 2022) and Gesture recognition datasets (Gupta, 2020). This schema utilizes 21 keypoints to construct a skeletal representation of the hand, encompassing the wrist joint and four articulations per finger. The source dataset comprises 26,768 images partitioned into training (18,776 images) and validation (7,992 images) subsets, labeled in the YOLO pose format.

To evaluate performance in violence intervention contexts, a custom dataset comprising 160 video samples was curated, balanced equally between the Signal for Help and Need Police classes (N = 80 per class). Data collection involved diverse participants, backgrounds, lighting conditions, and camera angles to ensure

ecological validity. In each frame, the hand region was annotated with the aforementioned 21-keypoint schema, ensuring direct compatibility with models trained on the source data.

2.2 Implementation Details

We compare two generations of the YOLO-pose family: YOLOv8-pose and YOLOv11-pose. YOLOv8 and YOLO11, characterized by lightweight architectures, enhanced detection precision, and native support for pose estimation tasks (Jafary, Shojaei, & Ehinger, 2025). YOLOv8 introduces a streamlined design featuring decoupled heads and a direct regression approach for keypoint prediction. By bypassing the heatmap generation step common in earlier single-stage pose estimators, this methodology enhances training efficiency and inference speeds, particularly in resource-constrained environments (Jafary et al., 2025; Dong, Tang, & Zhang, 2024).

YOLO11 incorporates architectural refinements such as a reinforced backbone, advanced feature aggregation via Cross-Stage Partial (CSP) networks, and integrated attention mechanisms(Sazak & Kotan, 2024). These enhancements improve spatial awareness and feature representation, allowing YOLO11 to achieve robustness across pose benchmarks (Khanam & Hussain, 2024).

Experiments were conducted on an A100 GPU utilizing the Google Colab environment. All models were trained for 150 epochs with a batch size of 32 and an input resolution of 640 × 640 pixels. Optimization was performed using the default AdamW/SGD configuration. To mitigate overfitting and improve generalization, data augmentation techniques were applied, including mosaic and mixup spatial transformations, horizontal flipping, scaling, and brightness/contrast perturbations. The model weights yielding the lowest validation loss were saved as best and utilized for subsequent testing.

For the real-time inference phase, test video frames are processed by the trained YOLO-pose models to detect hand landmarks. A gestural interpretation algorithm subsequently examines the positional characteristics linking these keypoints. An emergency alert is triggered immediately when the system detects a sequence of frames matching the target distress geometries.

2.3 Evaluation Metrics

Given the safety-critical nature of the application, the evaluation protocol prioritized the sensitivity of the Signal for Help (positive class). The system output was categorized into three states: Signal for Help, Need Police, and Miss (failure to detect). To rigorously assess performance in emergency scenarios, metrics were calculated based on a modified confusion matrix logic that strictly penalizes failures to identify distress signals: False Negatives (FN): For the positive class (Signal for Help), both complete detection failures ("Miss") and misclassifications (classifying Signal for Help as Need Police) were aggregated as FN. This ensures that the Recall metric reflects the system's ability to trigger an alert in all distress situations. Negative Class Handling: When evaluating the positive class, instances of the negative class (Need Police) that resulted in a "Miss" were not counted as False Positives (FP). Since the system correctly refrained from misidentifying these as Signal for Help, they do not contribute to the false alarm rate. Standard performance metrics were computed as follows:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{1}$$

$$\text{F1} = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \tag{2}$$

where P recision = T P/(T P + F P) and Recall = T P/(T P + F N). To provide a holistic performance summary, Macro F1 and Weighted F1 scores were computed to aggregate performance across both gesture classes.

3. RESULTS

The classification performance of the four YOLO-pose variants was evaluated using the test dataset. Table 1 summarizes the confusion matrix components for all tested architectures. For this analysis, the Need Police gesture is treated as the negative class, and the Signal for Help gesture as the positive class.

Table 1. Confusion matrix components for each model.

Model	TP	TN	FP	FN
YOLOV8n-pose	40	57	20	40
YOLOV8m-pose	59	69	11	21
YOLO11n-pose	43	52	21	37
YOLO11m-pose	**65**	**74**	**6**	**15**

As the optimal architecture, YOLO11m-pose achieved the highest number of TP and the lowest number of FP. These raw values translate into the performance metrics detailed in Table 2. YOLO11m-pose demonstrated superior performance across all primary indicators, achieving an overall accuracy of 86.8% and a Macro F1-score of 0.884. Notably, the medium (m) variants of both architectures consistently outperformed their nano (n) counterparts, confirming that the increased parameter count and architectural depth are critical for accurately resolving the fine-grained features of hand gestures.

Table 2. Comparative performance metrics. F1-scores are reported for both individual classes and as a macro average.

Model	Accuracy	Macro F1	F1 (Signal For Help)	F1 (Need Police)
YOLOV8n-pose	0.617	0.673	0.571	0.775
YOLOV8m-pose	0.800	0.799	0.787	0.881
YOLO11n-pose	0.620	0.660	0.597	0.722
YOLO11m-pose	**0.868**	**0.884**	**0.861**	**0.908**

Figure 2 presents sample detection results obtained from the YOLO11m-pose model. The system demonstrates 21-keypoint regression capabilities across diverse background conditions.

Crucially, the model maintains structural integrity during the Signal for Help gesture, specifically accurately tracking the thumb as it transitions into the palm (the "tuck" phase) and the subsequent finger flexion (the "trap" phase). This geometric precision is vital, as the distinction between a closed fist and the specific distress signal relies on the visibility and relative position of the thumb keypoints. The visualization confirms that the YOLO11m-pose architecture effectively disambiguates these fine-grained skeletal features, supporting its high F1-score reported in Table 2.

In safety-critical applications, a model's failure to detect a gesture entirely (a "Miss") poses a severe risk. We quantified this by tracking instances where the model failed to generate any class assignment. Misses for the Signal for Help class (T_{miss}) are critical false negatives, while Misses for the Need Police class (P_{miss}) indicate a failure to utilize the notification channel.

Table 3 presents the failure rates. The nano models exhibited alarmingly high miss rates for the Signal for Help gesture (37.5% for YOLOv8n and 31.25% for YOLO11n), rendering them unsuitable for high-stakes intervention systems. In contrast, the YOLO11m-pose model reduced the critical miss rate to 7.50%.

Although YOLOv8m-pose achieved a 0% miss rate, its overall classification accuracy (Table 2) was lower than that of YOLO11m-pose.



(a) Baseline (No Gesture) (b) Gesture Initialization (c) Signal for Help (End) (d) Need Police (End)

Figure 2. Qualitative detection results illustrating the temporal evolution of distress signals. (a) Baseline state with no active gesture. (b) The initialization phase, which serves as the common starting point for both signals. (c) Completion of the Signal for Help (thumb tucked). (d) Completion of the Need Police gesture.

Table 3. Analysis of detection failures (Misses). Tmiss denotes missed 'Signal for Help', and Pmiss denotes missed 'Need Police'.

Model	T_{miss}	T_{miss} Rate	P_{miss}	P_{miss} Rate	Total Miss Rate
YOLOV8n-pose	30	37.50%	3	3.75%	20.63%
YOLOV8m-pose	0	0.00%	0	0.00%	0.00%
YOLO11n-pose	25	31.25%	7	8.75%	20.00%
YOLO11m-pose	**6**	**7.50%**	**0**	**0.00%**	**3.75%**

The composition of these failure modes is visually detailed in Figure 3. The dominance of the red segments in the nano-model columns highlights a critical safety vulnerability: the majority of failures in low-capacity models correspond to the Signal for Help gesture. Conversely, the YOLO11m-pose architecture demonstrates a robust failure profile, reducing total misses to below 4% while maintaining high classification accuracy

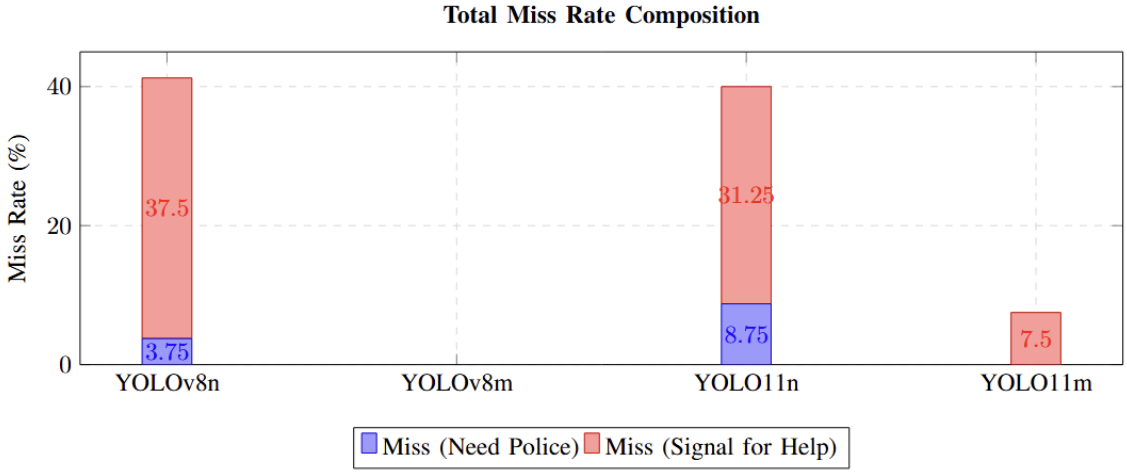


Figure 3. Stacked bar chart showing total miss rates.

4. DISCUSSION

The experimental results demonstrate that architectural capacity between (n) and (m) models plays a decisive role in the automated detection of emergency gestures. The YOLO11m-pose model surpassed all tested architectures across key performance metrics. Notably, the high F1-score of 0.908 for the Need Police class indicates that the model provides robust discrimination for this specific gesture, minimizing class confusion and ambiguity.

While the YOLOv8m-pose model offered balanced intermediate performance, it did not match the precision of the YOLO11 variant. Analysis of the error distribution reveals that while YOLOv8m successfully reduced FP and FN relative to the nano models, YOLO11m-pose further minimized these errors, resulting in a confusion matrix with the highest density along the main diagonal. This suggests that the architectural refinements in YOLO11 contribute directly to more reliable classification. A critical finding emerges when comparing the nano-scale architectures. The elevated FN rate and Miss count for the Signal for Help class in YOLO11n-pose suggest that this specific lightweight architecture lacks sufficient parameter count to resolve the fine-grained finger geometry required for this task. In emergency scenarios, this limitation translates into an unacceptable risk of failing to detect a valid distress signal.

5. CONCLUSION

This study evaluated the performance of nano and medium variants of YOLOv8-pose and YOLO11-pose architectures for the automated detection of Signal for Help and Need Police gestures. Aimed at strengthening violence intervention systems, the research utilized a curated custom dataset of 160 video samples, fully annotated with 21-point skeletal data compatible with the Ultralytics framework.

Experimental results identify YOLO11m-pose as the optimal architecture, demonstrating superior efficacy with the highest overall accuracy and F1-scores. Specifically, its ability to correctly classify the Need Police gesture establishes it as one of the reliable candidates for real-time deployment. While the YOLOv8m-pose model provided stable performance, it was outperformed by the architectural enhancements inherent in the YOLO11 variant. Conversely, analysis of the low-parameter regime reveals both nano models exhibited alarmingly high miss rates.

Future research will advance in three primary directions. First, the dataset will be expanded to encompass a broader lexicon of distress signals, such as Need Ambulance and I'm OK, while incorporating diverse environmental variables including varying lighting conditions and cultural contexts to ensure generalization. Second, investigation will shift toward ensemble approaches that integrate YOLO-pose with MediaPipe, Graph Convolutional Networks (GCNs), or Transformer-based architectures to further enhance robustness against occlusion and noise. Finally, the development of a real-time prototype application will facilitate the evaluation of end-to-end latency, false alarm rates, and user experience in ecologically valid settings.

REFERENCES

Afifi, M. (2019). 11k hands: gender recognition and biometric identification using a large dataset of hand images. *Multimedia Tools and Applications*. doi: 10.1007/ s11042-019-7424-8

Buccellato, F., Vacca, E., Azimi, S., De Sio, C., & Sterpone, L. (2025). From detection to intervention: An end-to-end system for recognizing the "signal for help" gesture in real-time. *Intelligent Systems with Applications*, 200536.

Cao, W., Lu, P., & Cao, W. (2024, 6). Multimodal gesture recognition with spatio-temporal features fusion based on yolov5 and mediapipe. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 38. doi: 10.1142/S0218001424550073

Ding, J., Niu, S., Nie, Z., & Zhu, W. (2024). Research on human posture estimation algorithm based on yolo-pose. *Sensors, 24*(10), 3036.

Dong, C., Tang, Y., & Zhang, L. (2024). Hda-pose: a real-time 2d human pose estimation method based on modified yolov8. *Signal, Image and Video Processing*, *18*(8), 5823–5839.

Giridhar, R. (2022). Hand gestures dataset. Kaggle. Available: *https://www.kaggle.com/datasets/ritikagiridhar/2000-hand-gestures*

Gunawan, M. R., & Djamal, E. C. (2021). Spatio-temporal approach using cnn-rnn in hand gesture recognition. In 2021 *4th international conference of computer and informatics engineering* (ic2ie) (pp. 385–389).

Gupta, S. (2020). Gesture recognition. Kaggle. Available: *https://www.kaggle.com/datasets/imsparsh/gesture-recognition*

Jafary, P., Shojaei, D., & Ehinger, K. A. (2025). Deep learning and geometric modeling for 3d reconstruction of subsurface utilities from gpr data. *Sensors, 25*(20), 6414.

Khanam, R., & Hussain, M. (2024). Yolov11: An overview of the key architectural enhancements. *arXiv preprint arXiv:2410.17725.*

Li, H.-H., & Hsieh, C.-C. (2025). Dynamic hand gesture recognition using mediapipe and transformer. *Engineering Proceedings, 108*(1), 22.

Mujahid, A., Awan, M. J., Yasin, A., Mohammed, M. A., Damaševicius, R., Maskeli ˇ unas, R., & Abdulkareem, K. H. (2021). ¯ Real-time hand gesture recognition based on deep learning yolov3 model. *Applied Sciences, 11*(9), 4164.

Oudah, M., Al-Naji, A., & Chahl, J. (2020). Hand gesture recognition based on computer vision: a review of techniques. *journal of Imaging*, *6*(8), 73.

Pan, Y., Chang, J., Dong, Z., Liu, B., Wang, L., Liu, H., & Ruan, J. (2025, 4). Pflo: a high-throughput pose estimation model for field maize based on yolo architecture. *Plant Methods*, 21, 51. doi: 10.1186/s13007-025-01369-6

Prakash, K. B., Eluri, R. K., Naidu, N. B., Nallamala, S. H., Mishra, P., & Dharani, P. (2020). Accurate hand gesture recognition using cnn and rnn approaches. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 9*(3).

Sazak, H., & Kotan, M. (2024). Automated blood cell detection and classification in microscopic images using yolov11 and optimized weights. *Diagnostics, 15*(1), 22.

Shankar, S., M, M. M. P., Joseph, M., & Kumar, B. (2025). Advancements in hand gesture technology for enhancing accessibility in disability assistance. In *2025 2nd international conference on new frontiers in communication, automation, management and security (iccams)* (p. 1-6). doi: 10.1109/ICCAMS65118.2025.11233903

Tan, C. K., Lim, K. M., Chang, R. K. Y., Lee, C. P., & Alqahtani, A. (2023). Hgr-vit: hand gesture recognition with vision transformer. *Sensors, 23*(12), 5555.

OTFS CHANNEL ESTIMATION WITH MULTIPLE PILOTS

THIERNO SADOU DIALLO
Kocaeli University, Engineering faculty, Electronics and Communications Engineering.
tsddonta22@gmail.com, ORCID: 0009-0001-6158-9838

Prof.Dr. SULTAN ALDIRMAZ COLAK
Kocaeli University, Engineering faculty, Electronics and Communications Engineering.
sultan.aldirmaz@kocaeli.edu.tr, ORID: 0000-0001-7154-0723

Abstract

Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) is a waveform particularly well suited for very high-mobility communications and channels exhibiting large delays, unlike Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), which tolerates high Doppler shifts poorly. This work proposes a channel estimation method that uses a frame containing two pilots placed in a judicious manner so as to minimize their mutual interference. The method is compatible with both integer and fractional delay–Doppler (DD) values, and it exploits the separability of the Delay–Doppler Resource Element (DDRE) to estimate delay shifts, Doppler shifts, and the channel gain for each channel path separately when the paths are sufficiently separable, a condition that depends on the delay and Doppler resolutions. To reduce complexity, the estimation focuses only on the region of the frame that contains the maximum energy (the location of the pilot, including its spreading). The estimates obtained from each pilot are then combined to reconstruct the DD parameters. The obtained results show that the method achieves a lower Normalized Mean Square Estimation Error (NMSE) than a single-pilot approach when the paths are sufficiently distinct. Moreover, the absence of large matrix inversions and the partial exploitation of the frame give the method significantly lower complexity compared to other existing OTFS estimators.

Keywords: OTFS, channel estimation, 6G, fractional delay-Doppler

1. INTRODUCTION

Since the advent of telecommunications, researchers have always opted for innovative communications systems to enable reliable and secure communication. Each generation offers improvements over the previous one in terms of speed, capacity and functionality. Today, generations beyond 5G are being studied. These generations will fill the gaps left by 4G and 5G. Because communication needs (in challenging propagation environments, spectral efficient, low latency, etc.) continue to increase from one day to the next. 4G and 5G use OFDM modulation, which has previously been very efficient. Because OFDM was able to solve the problems that 3G had to contend with (high mobility, inter-carrier interference (ICI), etc.). OFDM converts a frequency-selective channel into a flat fading channel, while dividing the channel bandwidth into several subcarriers as if using multiple channels. According to (Raviteja et al., 2019) for time-invariant frequency selective channels, OFDM can achieve good robustness and high spectral efficiency. “However, for high-mobility environments such as high-speed railway mobile communications, the channels can be typically time-varying with high Doppler spreads. Under such high Doppler conditions, OFDM is no longer robust and suffers heavy performance degradations” (Raviteja et al., 2019). Thus, like all its predecessors, OFDM has overcome the limitations of its predecessors. Faced with a number of problems, including the need to use millimetre waves (mmWave) to increase bandwidth, to communicate even when on the move (at high speeds), and so on. With this in mind, OTFS modulation is currently being studied and is proving its worth under difficult communications conditions.

“OTFS is a new modulation scheme whereby each transmitted symbol experiences a near-constant channel gain even in channels with high Doppler, large antenna arrays (massive MIMO), or at high frequencies such as mmWave “(Hadani et al., 2017). OTFS modulation is briefly described in (Hadani et al., 2017) and (Wei

et al., 2021). In (Wei et al., 2021) the authors first describe OTFS modulation and then talk about its areas of application, its performance, the challenges facing researchers like channel estimation, data detection, etc. The fundamental operating principles of OTFS make it a strong candidate for 6G systems.

In (Zhang et al., 2021) the authors use the link between OFDM and OTFS to briefly explain how OTFS works. They consider only a SISO system. It was observed that from the results obtained the proposed method has a good performance for the studied system. But the fact that this method is used for a path without delay (Line of Sight) makes it unsuitable for current channel estimation needs. Wei et al. (2021) Proposes a method for estimating the channel of an OTFS system with the off-grid method using Sparse Bayesian Learning (SBL). In their paper, the authors estimate the original channel response and reconstruct the effective channel response. They estimate on-grid and off-grid separately and reconstruct delay and Doppler after estimation. But even if this method has obtained a good result, it is highly complex (inversion of very large matrices) and therefore very difficult to implement.

Although single-pilot channel estimation is the most commonly used method in existing channel-estimation studies, the OTFS frame is larger compared to OFDM and its predecessors and the delay and Doppler spread increase accordingly. For this reason, when a single pilot is used, the energy of the received signals coming from longer paths (with large delays) may be very low, which can prevent accurate channel estimation. Therefore, in this paper, by utilising (Khan and Mohammed, 2023), the above-mentioned studies, and other related works, we propose a channel estimation method based on a two-pilot frame. With two well-positioned pilots inside the OTFS frame (minimising interference), the received signal contains more information about the channel compared to a single-pilot configuration. The weak signal from Pilot 1 can be compensated (balanced) by the signal from Pilot 2. In this way, channel estimation can be achieved with reduced error. A scenario with single transmit and receive antennas (SISO) is considered. The proposed method uses the maximum-likelihood estimator (MLE). This work introduces a more advanced channel-estimation method compared to traditional approaches (such as Least Squares, Mean Squared Error, and others), without the need to invert large matrices. The algorithm is less complex and allows not only the separate estimation of delays and Doppler shifts, but also the estimation of the delay-Doppler components for every path.

The rest of the work is structured as follows: Section 2 is about materials and methods, we talk about OTFS modulation and demodulation and we explain the proposed methods. Section 3 is about results, Section 4 about discussion. And conclusion is given in section 5.

Notations: In this work, matrices are represented by uppercase letters, while vectors are denoted by lowercase letters. For transforming a $M \times N$ matrix into a MN vector, or vice versa, we use the reshape command (MATLAB). M[: , k] and M[l , :] represent the k-th column and the l-th row, respectively. $(.)^{\mathbf{H}}$ represents the Hermitian transpose matrix and $\|.\|_{\mathbf{F}}$ denotes the Frobenius norm. Symbols $\lfloor . \rfloor$, $\lceil . \rceil$, $\lfloor . \rceil$ represent the floor, ceil, and round functions in MATLAB.

2.MATERIALS AND METHODS

We discuss OTFS modulation and demodulation and we briefly explain the proposed method in this part. Before presenting the proposed method, we explain the OTFS modulation through a diagram and mathematical formulas.

- OTFS is a two-dimensional waveform modulation scheme (delay and Doppler, DD). We can observe different types of notation in the existing work on OTFS. However, the operating principle remains the same: it involves a transformation performed at the transmitter and at the receiver.

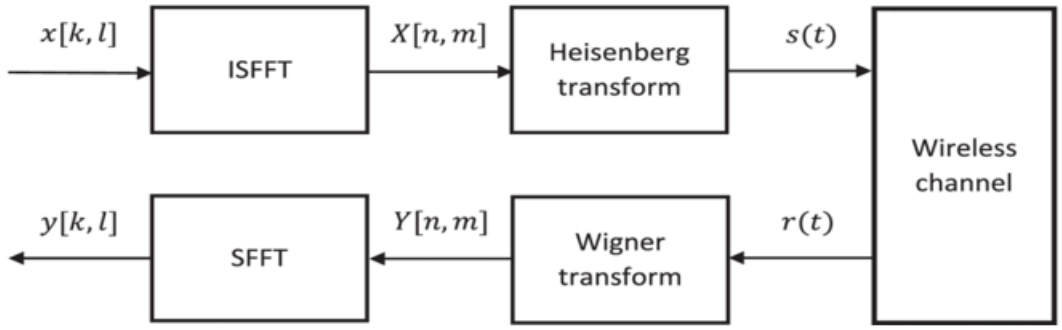


Figure 1. OTFS modulation / demodulation

As we see in Figure 1:

- At the transmitter, the symbol x [l, k] in the DD domain is transformed into the frequency-time (FT) domain X [m, n] by using the inverse symplectic finite Fourier transform (ISFFT).

$$X[m,n] = \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} x[l,k]\, e^{j2\pi(\frac{ml}{M} - \frac{nk}{N})} \quad (1)$$

Then X[m, n] is transformed into the time domain (TD) s(t) by using the Heisenberg transform before being transmitted over the transmission channel.

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} X[m,n] e^{j2\pi m\Delta f(t-nT)} g_{tx}(t - nT) \quad (2)$$

s(t) is then transmitted over the wireless channel with channel impulse response h (τ, ν). Where g_{tx} is the transmit pulse shape, T the sampling interval, Δf subcarriers interval, M is the number of subcarriers and N is the number of time slots. On reception, the signal can be written as:

$$r(t) = \iint h(\tau,\nu) e^{j2\pi\nu(t-\tau)} s(t-\tau) d\tau d\nu + z(t) \quad (3)$$

With $h(\tau,\nu) = \sum_{i=1}^{P} h_i \delta(\tau - \tau_i)\delta(\nu - \nu_i)$, where p is the number of paths, h_i, τ_i, and ν_i represent the complex gain, delay, and Doppler shift associated with the i-th path (Ouchikh et al., 2022). r(t) is converted into the FT domain Y[m, n] using the Wigner transform. Then Y[m, n] is converted into the DD domain y[k, l] using the SFFT in order to restore the transmitted signal x[k, l]. The symbol x[k, l] are estimated from y[k, l].

$$y[k,l] = \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} Y[m,n]\, e^{-j2\pi(\frac{ml}{M} - \frac{nk}{N})} \quad (4)$$

The principle of modulation remains to transform the transmitted symbols to adapt them to the transmission channel without distorting them, of course. This means adapting the signals to be transmitted to the conditions of the channel, while allowing them to be recovered without distortion (without error, ideal) or with as little error as possible. The principle of demodulation is that to permit obtaining the transmitted signal without error.

- Now, we explain the proposed method.

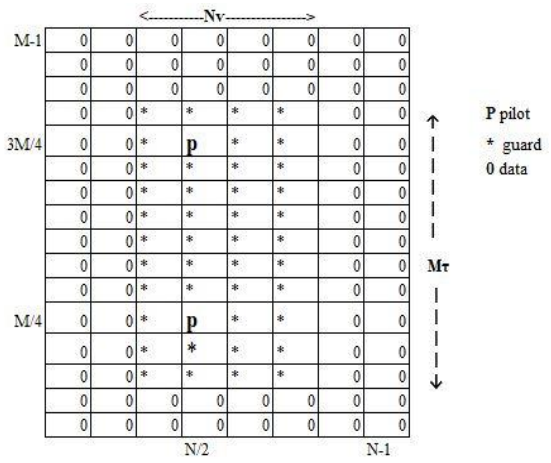


Figure 2. The considered OTFS frame

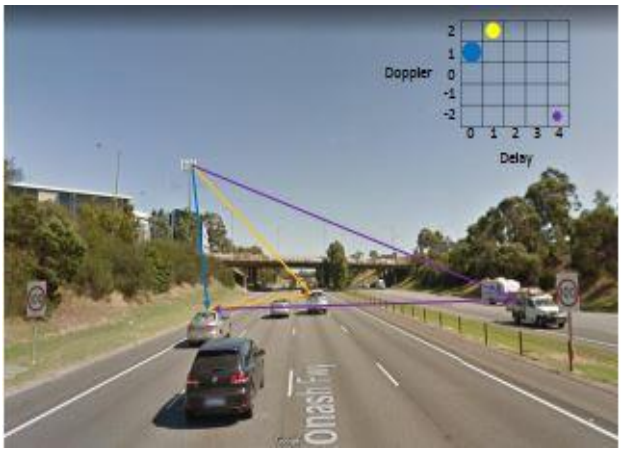


Figure 3. The considered scenario (Yi Hong et al., 2022)

As shown in Figure 2, in this work we consider an $M \times N$ frame containing two pilots that are sufficiently spaced to avoid mutual interference. Guard symbols are used to prevent or reduce interference between pilot–data and pilot–pilot signals. As illustrated in Figure 3, we also consider a scenario in which a mobile user receives a signal arriving through three different paths. The first path is line-of-sight (LOS), while the other two are non-line-of-sight (NLOS) with different delays and Doppler shifts. We used the same principle for the random generation of delays and Doppler shifts as in (Khan and Mohammed, 2023). In our scenario we can write symbol received at (l', k')-th element as:

$$y\,[l', k'] = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{i=1}^{p} h_i' \alpha_{l,k,l',k'}(\tau_i, v_i) x[l, k] + \hat{v}[l', k'] \quad (5)$$

Where k'=0, 1, ..., N-1, l'=0, 1, …, M-1 and $\alpha_{l,k,l',k'}(\tau_i, v_i)$ represents the term of Doppler, delay and a phase correction of delay and Doppler see formula (6). x[l, k] is the transmitted symbol et $\hat{v}[l', k']$ the additive white Gaussian noise (AWGN). The term $\alpha_{l,k,l',k'}(\tau_i, v_i)$ is given by:

$$a_{l,k,l',k'}(\tau_i, v_i) = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N-1} e^{-j2\Pi nT\left((k'-k)\triangle_v - v_i\right)}\right]\left[\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M-1} e^{j2\Pi mDf\left((l'-l)\triangle_\tau - \tau_i\right)}\right]\begin{cases} e^{-j2\Pi \frac{v_i l T}{M}} & ,l \in [0,\ M-1-\lceil \tau_i Mdf \rceil] \\ e^{-j2\Pi\left\{v_i T\left(\frac{l}{M}+1\right)+\frac{k}{N}\right\}} & ,l \in [M-\lceil \tau_i Mdf \rceil,\ M-1] \end{cases} \quad (6)$$

Where $\triangle_v$ and $\triangle_\tau$ represent Doppler and delay resolution respectively.

In vector form we can write (5) like:

$$\hat{y} = \mathbf{H}x + \hat{v} \quad (7)$$

Where **H** is the channel matrix with $\sum_{i=1}^{p} h'_i\, \alpha_{l,k,l',k'}(\tau_i, v_i)$ as the element in its (k'M+l'+1)-th row and (kM+l+1)-th column.

We consider a single OTFS frame containing two pilots transmitted at (l=lp1, k=kp1 and l=lp2, k=kp2)-th DDRE. The DD pilot signals are:

$$y_{p1}[l,k] = \begin{cases} \sqrt{MNE_p/2}\,, & l = l_{p1},\ k = k_{p1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{and} \quad y_{p2}[l,k] = \begin{cases} \sqrt{MNE_p/2}\,, & l = l_{p2},\ k = k_{p2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{8}$$

The received pilot signal y_p contains both y_{p1} and y_{p2}. By using (5), (7), and (8) y_p can be written as follows:

$$y_p = \sqrt{MNE_p}\sum_{i=1}^{p} h_i' a(\tau_i, v_i) + \hat{v} = A(\tau, v)h' + \hat{v} \tag{9}$$

where $a(\tau_i, v_i)$ is an *MN x 1* vector has $a_{lp,kp,l',k'}(\tau_i, v_i)$ as its (K'M+l'+1)-th element for every pilot and A is an *MN*×*p* matrix (where *p* is the number of paths) that contains $\sqrt{MNE_p}\, a(\tau_i, v_i)$ as its i-th column (i=1, …, *p*).

The objective is to estimate the channel parameters (τ, v, h′) from equation (9). This equation contains the received signal from two pilots coming from different paths, as well as noise. By using the MLE method, we obtain:

$$(\hat{\tau}, \hat{v}) = \arg\max_{\tau,\, v}[y_p^H A(\tau, v)(A(\tau,\ v)^H A(\tau, v))^{-1} A(\tau, v)^H y_p]$$

$$\widehat{h'} = (A(\hat{\tau}, \hat{v})^H\, A(\hat{\tau}, \hat{v}))^{-1} A(\hat{\tau}, \hat{v})^H y_p \tag{10}$$

For this OTFS frame, *M* and *N* must take large values in order to avoid interference between pilots. As shown in Figures 4.a and 4.b, the larger these values are, the smaller the delay ($\triangle_\tau$) and Doppler ($\triangle_v$) resolutions become, which enables path separability. That is, as *M* and *N* tend to infinity, the vectors $a(\tau_i, v_i)$ become orthogonal to each other (see (Khan and Mohammed, 2023) for more details) and $A(\tau,\ v)^H A(\tau, v)$ becomes equivalent to $(MNE_p)\mathbf{I_p}$. In this case, the cost function can be written as follows:

$$(\hat{\tau},\ \hat{\hat{v}}) = \arg\max_{\tau,\, v}\sum_{i=1}^{p} |a(\tau_i,\ v_i)^H y_p|^2,\ \widehat{\widehat{h'}} = \frac{A(\hat{\tau}, \hat{\hat{v}})^H y_p}{MNE_p} \tag{11}$$

We now observe that the cost function depends on the delay and Doppler parameters of each path. Since the different paths become separable for large values of *M* and *N*, from (11) we can obtain a cost function that enables the estimation of the parameters (delay, Doppler, and channel gain) of each path. This function is written as follows:

$$(\hat{\tau}_i,\ \hat{\hat{v}}_i) = \arg\max_{\tau,\, v}|a(\tau,\ v)^H y_p|^2,\ \widehat{\widehat{h_l'}} = \frac{A(\hat{\tau}_i, \hat{\hat{v}}_i)^H y_p}{\sqrt{MNE_p}} \tag{12}$$

From (12), it now becomes possible to estimate the channel parameters for each path. The proposed method is iterative: it estimates the parameters of the path with the highest received energy, subtracts its contribution from the received signal, and then proceeds to the next path, which has the next highest energy. The third path, which has the lowest energy compared to the other two, is estimated last. The algorithm performs this procedure for both pilots and stops when the maximum number of iterations (T_{max}) is reached, when an error threshold (10^{-3}) is achieved, or when all three paths have been detected. We followed the same principle as Algorithm 1 in (Khan and Mohammed, 2023), with the only difference being that our method uses two pilots instead of one. After estimation, the algorithm rearranges all parameters in the same order as the delay (in ascending order) to ensure that there is no mixing between components from different paths. If all paths are detected and estimated, the components of each parameter (delay, Doppler, channel gain) are reconstructed using the arithmetic mean. If not, the corresponding path of the detected pilot is considered without using the mean. Once the estimation of all parameters is completed, the channel matrix **H** is reconstructed using the estimated parameters in order to plot the NMSE curve to compare the true channel with the estimated one.

3. RESULTS

In this section, we present the used parameters and the results obtained. For the simulation, we used two pilots placed at $(l_{p1},k_{p1}) = [\frac{M}{4}+1, \frac{N}{2}+1]$ for pilot 1 and at $(l_{p2},k_{p2}) = [\frac{3M}{4}+1, \frac{N}{2}+1]$ for pilot 2. Both pilots are protected by guard symbols of size $2M_\tau N_\nu$ with $M_\tau = \lceil MDf\tau_{max} \rceil + 1$ and $N_\nu = 2\lceil NT\nu_{max} \rceil + 1$. The maximum delay is τ_{max}=2(p-1) $\times 10^{-6}$ (second) and $\nu_{max} = \frac{v}{\lambda}$ (Hz) where v is the speed of the user and $\lambda = \frac{c}{f_c}$ (with c =3×10^8 m/s) and f_c denotes the carrier frequency. We considered a mobile user moving at a speed of 110 m/s and a carrier frequency (fc) of 6 GHz. To illustrate path separability, we used *M=N=16* and *M=N=64* (Figures 4(a) and 4(b)). The parameter values used for Figures 4(a) and 4(b) are summarized in Table 1. We note that no modulation was used for channel estimation, and zeros were transmitted instead of data. Our interest is solely in the pilot symbols. A separate frame will be used for data detection in future studies and related work.

Table 1: parameters used for figure 4.a and 4.b

Path No	Delays (microsecond)	Doppler (Hertz)	Channel gain	PSNR (dB)	Speed (m/s)	Frequency (Hertz)
1	0	2200	1+j	15	110	6*10^9
2	1.064	1634.4	0.7+0.0076j			
3	3.72	1329.3	0.4+0.012			

For the NMSE evaluation, the parameters are: *M=64, N=32*, T_{max}=8, p=3, Δf=15 kHz, n_ν=11 (Doppler discretization), $m_\tau = 6$ (delay discretization), and a pilot signal-to-noise ratio (PSNR) ranging from 0 to 25 dB, etc. The obtained results are presented in Figures 4(a), 4(b), 5, Table 2, and Table 3.

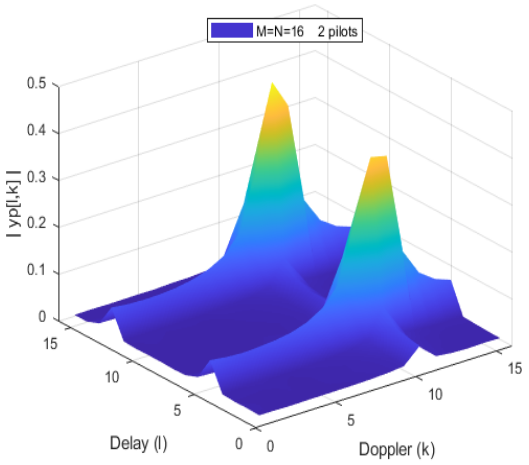


Figure 4.a: Channel path separability in DD domain with M=N=16

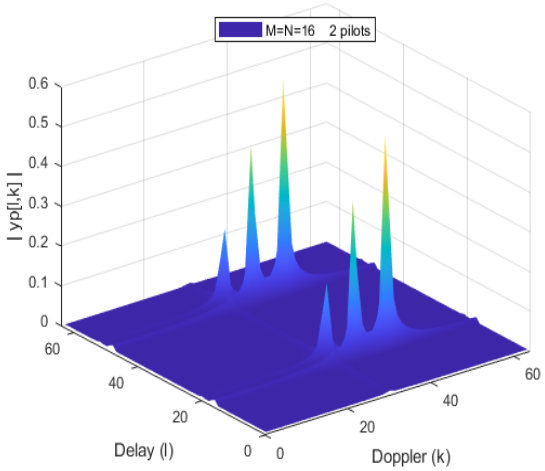


Figure 4.b: Channel path separability in DD domain with M=N=64

The NMSE curve is plotted using the parameters of the true channel and those of the estimated channel. It compares the performance of the proposed method when using a single pilot and two pilots, assuming that the paths are sufficiently separable. It is given by the following formula:

$$\text{NMSE} = \mathbb{E}\left[\frac{||\hat{\mathbf{H}}-\mathbf{H}||_F^2}{||\mathbf{H}||_F^2}\right] \quad (13)$$

In Tables 2 and 3, we present a comparative study between true delays and Doppler and their estimates for PSNR values of 5 and 25 dB.

Table 2: True channel parameters vs estimated parameters for PSNR = 5 dB

Paths No	True delays (microsecond)	Estimated delays (microsecond)	True Doppler (Hertz)	Estimated Doppler (Hertz)
1	0	0	2200	2215.9
2	1.114	1.215	283.6	299.3
3	3.367	3.299	973	987.1

Table 3. True channel parameters vs estimated parameters for PSNR = 25 dB

Paths No	True delays (microsecond)	Estimated delays (microsecond)	True Doppler (Hertz)	Estimated Doppler (Hertz)
1	0	0	2200	2215.9
2	1.937	1.910	-1345.2	-1349
3	3.514	3.472	-1722.6	-1718.3

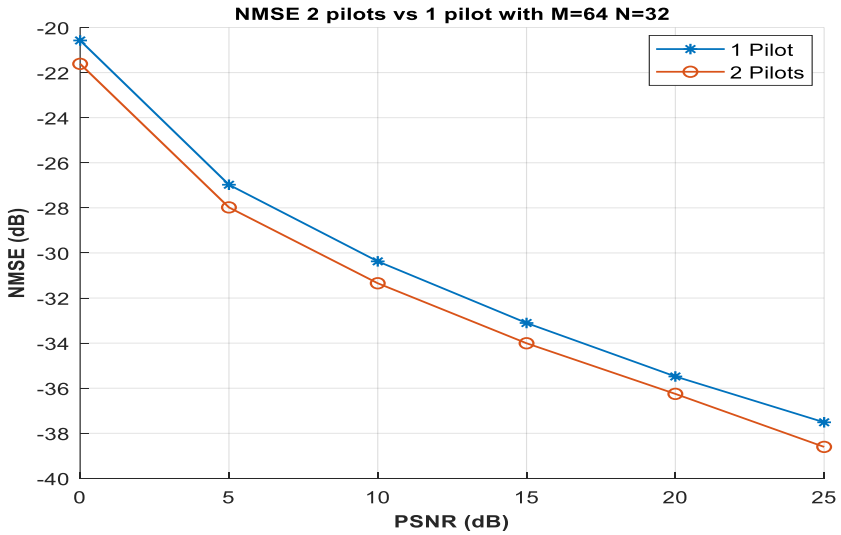


Figure 5. NMSE for proposed method and one pilot method

4. DISCUSSION

In this section, we interpret the obtained results. From Figure 4(a), we observe that the different paths are not separable when the values of *M* and *N* are small. However, Figure 4(b) shows that when *M* and *N* are large, the paths become sufficiently separable. This separability depends on the delay and Doppler resolutions and plays an important role in the channel estimation process for the proposed method. The more separable the paths are, the better the performance of the method.

By comparing Tables 2 and 3, we observe that the higher the PSNR, the closer the estimated values are to the true values. The high error rate at low PSNR is due to noise. Therefore, the performance of the method depends on both the separability of the paths and the PSNR level.

From the curve in Figure 5, we clearly observe an improvement in NMSE when using two pilots for channel estimation compared to using a single pilot, provided that the paths are well separated. The use of two pilots yields an improvement of about 1 dB relative to one pilot. This improvement is due to the compensation of paths with large delays between the two pilots and, more importantly, to the fact that a frame with two non-interfering pilots contains more information about the channel than a frame with only one pilot when the frame size is very large.

5. CONCLUSION

We proposed an iterative OTFS channel estimation method that uses two pilots within the same frame. The proposed approach demonstrated an improvement in NMSE performance compared to using a single pilot, particularly when the propagation paths are sufficiently separable. The method is off-grid and has lower computational complexity compared to existing techniques that require the inversion of very large matrices.

REFERENCES

Drémeau, A., Herzet, C. and Daudet, L. 2012. Boltzmann machine and mean-field approximation for structured sparse decompositions. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 60(7), 3425–3438.

Hadani, R., Rakib, S., Tsatsanis, M., Monk, A., Goldsmith, A. J., Molisch, A. F. and Calderbank, R. 2017. Orthogonal time frequency space modulation. In *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, San Francisco, pp. 1–6.

Heath, R. W., Gonzalez-Prelcic, N., Rangan, S., Roh, W. and Sayeed, A. 2016. An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 10(3), 436–453.

Hong, Y., Thaj, T. and Viterbo, E. 2022. *Delay-Doppler Communications: Principles and Applications*. Amsterdam: Elsevier.

Ju, R., Guo, Y., Hou, X., He, J., Li, T., Lan, Z., & Chou, X. (2024). Multi-Pilot Channel Estimation for Orthogonal Time–Frequency Space Systems Based on Constant-Amplitude Zero-Autocorrelation Sequences. Sensors, 24(23), 7588. Available at :
https://doi.org/10.3390/s24237588

Khan, I. A. and Mohammed, S. K. 2023. A low-complexity OTFS channel estimation method for fractional delay-Doppler scenarios. *IEEE Wireless Communications Letters*, 12(9), 1484–1488.

Ouchikh, R., Aïssa-El-Bey, A., Chonavel, T. and Djeddou, M. 2022. Iterative channel estimation and data detection algorithm for OTFS modulation. In *ICASSP 2022*, Singapore, pp. 5263–5267.

Raviteja, P., Phan, K. T., Jin, Q., Hong, Y. and Viterbo, E. 2018. Low-complexity iterative detection for orthogonal time frequency space modulation. In *IEEE WCNC*, pp. 1–6.

Raviteja, P., Phan, K. T. and Hong, Y. 2019. Embedded pilot-aided channel estimation for OTFS in delay–Doppler channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(5), 4906–4917.

Wei, Z., Yuan, W., Li, S., Yuan, J. and Ng, D. W. K. 2021. A new off-grid channel estimation method with sparse Bayesian learning for OTFS systems. In *IEEE GLOBECOM*, Madrid, pp. 1–7.

Wei, Z., Yuan, W., Li, S., Yuan, J., Bharatula, G., Hadani, R. and Hanzo, L. 2021. Orthogonal time-frequency space modulation: A promising next-generation waveform. *IEEE Wireless Communications*, early access, pp. 1–9.

Zhang, H., Huang, X. and Zhang, J. A. 2021. Frequency domain pilot-aided channel estimation for OTFS over fast fading channels. In *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 1–5.

DÜZENSİZ ATIK TOPLAMA İÇİN MOBİL UYGULAMA

Öğr. Gör. ALİ TUNA DİNÇER
Kırklareli Üniversitesi, Lüleburgaz Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü
alitunadincer@klu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6161-831X

Prof. Dr. MEHMET YILDIRIM
Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü
myildirim@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1676-1560

Özet

Bu çalışmada, akıllı şehirler kapsamında yerel yönetimlerin atık toplama birimlerinin düzensiz atık toplama hizmetlerinde kullanılabilecek mobil destekli bir uygulama geliştirilmiştir. Düzensiz atıklar, vatandaşlar veya işletmeler tarafından periyodik olarak üretilmeyen, anlık olarak ve beklenmedik şekilde ortaya çıkan inşaat molozu, bitkisel yağ atığı, madeni yağ atığı, bağ-bahçe atığı gibi, genellikle büyük miktarda atıklarından oluşmaktadır. Bu atıkların yerel yönetimlerce toplanması için bildirim yapılmadığı sürece, kent içerisinde birikmekte ve çevresel kirliliğe neden olabilmektedir. Geliştirilen çalışmada, bir mobil uygulama aracılığıyla vatandaşlar ürettikleri düzensiz atıkları yerel yönetime; bildirim sahibi, atık konumu, atık türü, miktarı ve görselleriyle birlikte toplanması için bildirebilmektedir. Vatandaşlar ister atığın başında bulundukları konumu, isterse de farklı bir lokasyonda bulunan atığın konumunu harita üzerinden bildirebilmektedirler. Böylece, geleneksel telefon veya dilekçe tabanlı bildirim süreçlerinden çok daha hızlı, izlenebilir ve zahmetsiz bir hizmet sunma olanağı sağlamaktadır. Bildirim konumlarının işlenmesi ve harita üzerinde gösterimi için Google Maps API kullanılmıştır. Bildirim verilerinin tamamı, yerel yönetim tarafında veri tabanına kaydedilmekte; böylece ilgili personel hem mobil hem de web tabanlı uygulama üzerinden tüm bildirimlere erişebilmektedir. Toplama sürecinde, verimliliği artırmak amacıyla atık konumlarının optimum sırayla dolaşılması gerekmektedir. Bu nedenle, çalışmada geliştirilen uygulamada Genetik Algoritma kullanılarak rota optimizasyonu yapılmaktadır. Panel üzerinden optimize edilecek bildirimler algoritmaya gönderilmekte ve atık konumları arasındaki en kısa ve ekonomik rota üretilmektedir. Çalışmanın önemli katkılarından biri de rota optimizasyonunun yalnızca statik olarak değil, Google Distance Matrix API entegrasyonuyla, gerçek zamanlı trafik verileriyle hesaplanmasıdır. Böylece yoğun kent merkezlerinde zamandan ve yakıttan tasarruf sağlanırken, vatandaşlara da modern bir hizmet verme imkânı ortaya çıkmaktadır. Bu yönüyle akıllı şehirler kapsamında geliştirilen çalışma, mobil bildirim sistemi ve yapay zekâ destekli toplama rotası optimizasyonunu bütünleştirerek, yenilikçi bir düzensiz atık toplama altyapısı ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Şehirler, Düzensiz Atık, Genetik Algoritma, Rota Optimizasyonu

MOBILE APPLICATION FOR IRREGULAR WASTE COLLECTION

Abstract

In this study, a mobile-supported application is developed for municipalities' irregular waste collection services within the context of smart cities. Irregular waste consists of wastes such as construction rubble, organic oil waste, mechanical oil waste, and orchard waste, which are not periodically generated by citizens or businesses, but rather emerge spontaneously and unexpectedly. Unless reported to municipalities for collection, these wastes accumulate within the city and can cause environmental pollution. In this study, citizens can use a mobile application to report their irregular waste to the municipality for collection, including the person reporting it, the waste location, type of waste, the amount of waste, and visuals. Citizens can report their current location at the waste collection site or the location of waste located at a different location on a map. This allows for a much faster, more traceable, and easy service than traditional phone-based or petition-based reporting processes. The Google Maps API is used to process and display

notification locations on the map. All notification data is recorded in the municipality's database, allowing relevant personnel to access all notifications through both mobile and web-based applications. During the collection process, waste locations must be navigated in the optimal order to increase efficiency. Therefore, the application developed in this study utilizes a genetic algorithm for route optimization. Optimized notifications are sent to the algorithm, which generates the shortest and most economical route between waste locations. A key contribution of this study is that route optimization is calculated not only statically but also using real-time traffic data through Google Distance Matrix API integration. This saves time and fuel in busy city centers while also providing citizens with a modern service. In this respect, the study, developed within the context of smart cities, integrates a mobile notification system and AI-powered collection route optimization to create an innovative, irregulated waste collection infrastructure.

Keywords: Smart Cities, Irregular Waste, Genetic Algorithm, Route Optimization

1. GİRİŞ

Günümüzde çevre kirliliği, insan sağlığına ve ekosistemlere zarar veren ciddi bir sorundur. Özellikle kentsel alanlarda, atık yönetimi büyük bir önem arz etmektedir. Düzensiz atıkların oluştuğu anda toplanması, geri dönüşüm süreçlerinin etkin bir şekilde yönetilmesi ve çevreye zararlı atıkların bertaraf edilmesi, sürdürülebilir bir gelecek için elzemdir. Kentleşmenin çok hızlı bir şekilde ilerlemesi, buna paralel olarak gelişen hızlı nüfus artışı ve gerek insan gerekse de diğer kirleticilerin çevre üzerindeki baskısı her geçen gün artmaktadır (Kaçtıoğlu ve Şengül, 2010). Çağdaş ve düzenli bir şehir yaşamının sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi ve kaynakların en verimli şekilde kullanılabilmesi için en önemli hizmetlerden biri teknolojik olarak üstün hizmetlerle donatılmış bir atık yönetimi sisteminden geçmektedir.

Atıkların düzenli ve belli bir plan çerçevesinde periyodik olarak toplanması halk sağlığının korunması, daha çevreci ve sürdürülebilir bir yaşamın yanında kirliliğin önlenmesiyle beraber döngüsel ekonomiye de katkı sunmaktadır (UNEP & ISWA, 2015). Toplu yaşam alanlarında atık toplama hizmetlerinin aksadığı ve düzenli bir biçimde yapılmadığı durumlarda hastalıkların artması, yangın gibi afetler ve estetik açıdan koku sorunlarının oluşmasının yanında doğal kaynaklar olan su ve toprak kirliliğini ciddi bir şekilde artırdığı bilinmektedir (UN- Habitat, 2010). Bu bağlamda, atıkların düzenli toplanmasının gerekliliği birçok boyutta incelenmekte ve sağlık, çevre ve kaynak verimliliği başlıkları altında gerekçelere dayandırılmaktadır.

Atık toplama süreçleri geleneksel olarak kapıdan-kapıya yöntemler, konteynerler aracılığıyla toplama ve aktarma istasyonları vasıtasıyla yürütülmekte ve atık toplama araçlarının rota planlaması ve araç optimizasyonunu atık toplayıcıların işletme maliyetlerini etkileyen temel faktörlerdir (Das & Bhattacharyya, 2015; Vu et al., 2018). Günümüzde teknolojik gelişmelere paralel olarak yönetilen bu operasyonların sensör, coğrafi bilgi sistemleri, nesnelerin interneti ve mobil uygulamalar aracılığıyla dijitalleşmesi gündeme gelerek atık toplama faaliyetlerinin verimliliğini artırmaya ve maliyetini düşürmeye yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır. Atık yönetim süreçlerinde özellikle mobil uygulamaların kullanılması hem yerel yönetimler hem de vatandaşlar için faydaları beraberinde getirmektedir. Atık yönetiminin en önemli paydaşı olan vatandaşların, mobil uygulamalar üzerinden konteyner doluluk bildirimi yapabilmesi, olumsuz durumları bildirebilmesi halkın yönetime katılım düzeyini artırmaktadır (Cicala et al.,2024; Medina-Medina et al.,2024), ayrıca nesnelerin interneti uygulamalarıyla sensörlerle entegre edilmiş uygulamalar sayesinde toplama sıklığı dinamik olarak ayarlanabilmekte ve düşük karbon politikası doğrultusunda yakıt tüketimleri azaltılabilmektedir (Saha et al., 2023; Alourani et al., 2025). Böylece, mobil uygulamalar yalnıza işletme verimliliklerini değil, aynı zamanda toplumun süreçlere katılımının artmasını, farkındalık geliştirmesini ve atık yönetim süreçlerinin güçlenmesini sağlamaktadır.

Literatür taraması kapsamında incelenen çalışmalarda, normal yaşam faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan düzenli atıklara odaklanıldığı, herhangi bir özel veritabanı bağlantılı uygulama olmadan optimizasyon çalışmaları yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmada, ne zaman ve nerede ortaya çıkacağı belli olmayan, insani veya endüstriyel bir faaliyet kapsamında ortaya çıkan düzensiz atıklara odaklanarak, bu kapsamda

vatandaşların atık toplama görevini üstlenen yerel yönetimlere en hızlı şekilde ulaşmasını, düzensiz atık toplama mobil uygulamasıyla bildirim yapmasını sağlayarak sürecin dinamik bir hal kazanması hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Paolo ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, katı atık toplamanın yerel yönetimler için en büyük gider kalemlerinden biri olduğu ve bu alanda yapılacak küçük iyileştirmelerin bile büyük kazanımlara yol açacağı düşüncesi üzerinden yeni bir yöntem geliştirilme yoluna gidilmiştir. Araştırmacılar makalede minimum uzunluktaki yolun fonksiyonunu minimize etmek için Genetik Algoritma (GA) kullanmışlardır. Önerilen algoritma, geleneksel algoritmadan daha iyi çözümler bulabilmiş, en iyi durumda %21'lik bir iyileşme sağlamışlardır (Paolo et al., 2003).

Karadimas ve arkadaşları yazmış oldukları makalede, Atina-Yunanistan'da kentsel katı atık toplama rotalarını optimize etmek için Genetik Algoritmaları kullanarak farklı senaryoları simüle etmişlerdir. Çalışmalarında, kent genelinde atık toplama için oluşturulan rota maliyetinde mevcut yönteme göre %9,62'lik bir azalma olduğu görülmüştür (Karadimas et al., 2007).

Fujdiak ve arkadaşları tarafından yapılmış olan bir makale çalışmasında, akıllı şehirlerde genetik algoritma temelli gelişmiş bir çöp toplama sistemi ortaya konulmuştur. Çalışmada, çöp kovalarının boş ve dolu olma durumunu tespit eden ve buna göre toplama rotası oluşturan bir sistem geliştirdikleri görülmektedir (Fujdiak et al., 2016).

Melo ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, büyükşehirlerde çöp toplama sorununun, dünya genelinde birçok şehirde gerçek bir problem haline geldiğini ifade etmişlerdir. Çalışmada, çöp toplama araçlarının kapasitesini aşmayan noktalara gönderilmesi ile %15'e varan bir maliyet azaltmanın mümkün olacağı vurgulanmıştır (Melo et al., 2017).

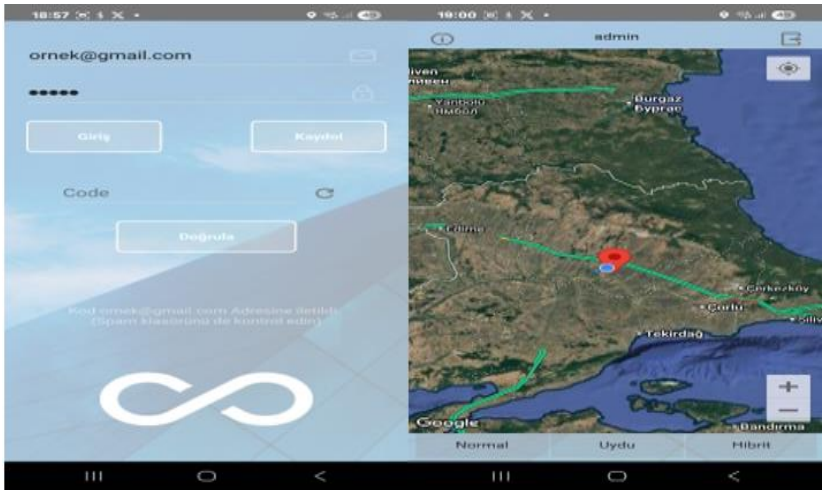
Yapılan kapsamlı literatür taraması sonucunda, bizim çalışmamızda önerdiğimiz yönteme benzer bir çalışmanın yapılmadığı görülmektedir. Ortaya koyulan çalışmaların tamamı, düzenli atıkların periyodik olarak toplandığı, sabit rutin bir rota üzerinde optimizasyon yapmaktadır. Herhangi bir veritabanı kullanarak veri kaydı yapılmamaktadır. Ayrıca senkronize çalışan herhangi bir uygulama içermemektedirler. Ortak yönler ise, çalışmamızda olduğu gibi, literatürde yer alan çalışmalarda da mesafe, zaman ve maliyet yönünden kazanç sağlama amaçlanmaktadır.

3. MOBİL UYGULAMA ile DÜZENSİZ ATIK BİLDİRİMİ

Geliştirilen uygulama kapsamında veri toplamamızı sağlayacak olan mobil uygulama, vatandaşların ve yerel yönetimlerin düzensiz atık yönetimini kolaylaştırmayı hedeflemektedir. Ayrıca atık toplama hizmetinin güncel teknolojilerle donatılması, çevreye duyarlı bir yaklaşımın ötesinde, vatandaşların hayat kalitesine etki etmesi de beklenmektedir. Uygulama aracılığıyla, evlerinden veya iş yerlerinden çıkmadan, atık toplama hizmeti talebinde bulunabilecek ve bu sayede konforlu bir atık yönetimi gerçekleştirilmiş olacaktır. Bu talepler, atık toplama araçları tarafından belirlenen saat dilimlerinde, geliştirilen yöntem sayesinde optimal rota kullanılarak enerjiden, zamandan ve iş gücünden tasarruf sağlayarak yerine getirilmektedir.

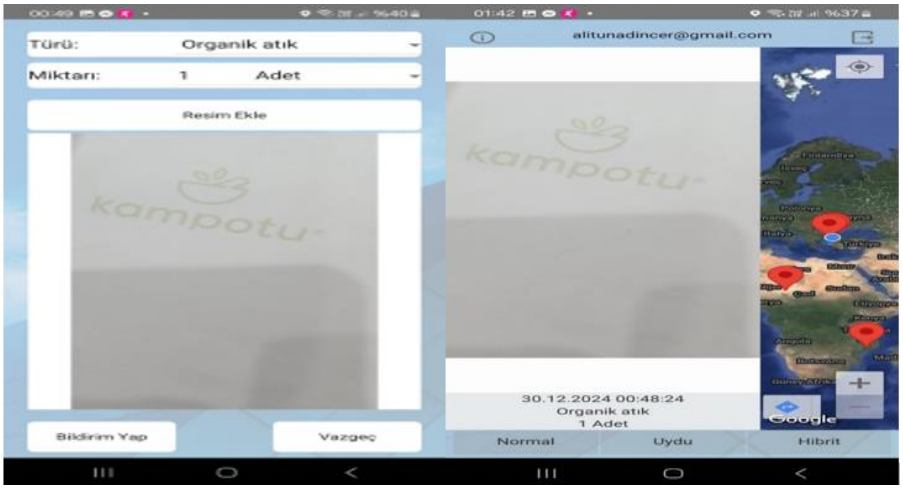
Şekil 1'de görüldüğü üzere, mobil uygulamada, atık bildirimi yapanların kişisel verilerini almak amacıyla, uygulamaya giriş için kullanıcı adı ve şifre giriş TextBox alanı bulunmaktır. Kullanıcı bu bilgileri girerek giriş işlemini gerçekleştirmektedir. Eğer kullanıcı kayıtlı bir kullanıcı değilse "Kaydol" butonu aktif olmaktadır ve girilen mail adresi ve şifre kaydedilmek üzere tutulmaktadır. Kullanıcının veritabanına kaydedilmesi mail adresine gönderilen bir doğrulama kodunu doğru bir şekilde girmesinin ardından yapılmaktadır. Böylece olası bir saldırıya karşı önlem alınmaktadır. Yeni kullanıcı veritabanına eklendikten sonra Şekil 1'de gösterildiği gibi harita açılmaktadır. Bu haritada, kullanıcı atık yanında ise kendi konumunu, isterse de farklı bir konumda bulunan atık için harita üzerinden konum seçebilmektedir. Atık konum bildirimi yalnızca bir adetle sınırlı değildir, kullanıcı dilediği kadar konumu mail adresi üzerinden

sisteme gönderebilmektedir. Konum işlemleri için Google Maps API kullanılmaktadır. Bildirimde bulunulan atık konumu veri tabanına eklenmektedir.



Şekil 1. Mobil Uygulama Arayüzü

Kullanıcının atığın bulunduğu konumu harita üzerinde işaretlemesinin ardından, Şekil 2'de görüldüğü gibi, yeni bir sayfada atığın organik yağ atığı, mekanik yağ atığı, inşaat molozu, evsel atık, fabrika atığı, kağıt atık vb. hangi türe ait olduğunu seçebileceği bir alan bulunmaktadır. Türe ait seçimi yapmasının ardından atığın adet, kilogram veya çuval gibi ölçülerde miktarını girdiği bir alan tanımlanmıştır. Bu alanlar atık toplama araçlarının ve rotanın optimize edilebilmesi için gerekli alanlardır. Bu işlemin ardından, kullanıcı ister mobil telefonunun kamerasından anlık olarak, isterse de galerisinde yer alan önceden çekilmiş resimlerden atığın fotoğrafını veritabanına kaydederek ve "Bildirim Yap" butonuna tıklayarak atık bildirimini tamamlamaktadır. Atık toplayıcılarının, önceden atık türü ve miktarı hakkında bilgi sahibi olmaları açısından atık resminin veritabanına kaydedilmesi önemlidir. Kullanıcı yaptığı atık bildirimlerini, harita üzerindeki işaretçiye dokunmasıyla beraber Şekil 2'de gösterildiği gibi, ekranın ikiye bölünmesi işlemiyle görüntüleyebilmektedir. Bu ekranda, kullanıcının yüklemiş olduğu resim de görüntülenmektedir. Bunun yanında, atık bildiriminin hangi tarihte yüklendiği ve türü de gösterilmektedir. Tasarlanan mobil uygulama, kullanıcın yapmış olduğu bir bildirimin silinmesine de olanak vermektedir.



Şekil 2. Atık Bildirim İşlemleri

3.1 Google Maps API Konum İşlemleri

Google Konum Servisleri; kullanıcıların mevcut konumlarını belirlemek, harita hizmetleri sağlamak ve acil durumlarda hızlıca konum bilgisine ulaşmak amacıyla kullanılan bir uygulamadır. Harita üzerinde arama yapma, rota planlaması, trafik bilgileri gibi birçok hizmeti kullanıcılarına sunan bir hizmettir. Kullanıcılar Google Konum Servisleri sayesinde sokak düzeyine kadar detaylı bir harita üzerinden konum bilgilerine ulaşılabilmektedir. Böylece kullanıcılar gidecekleri bir rotayı yüksek bir doğrulukla planlayıp ulaşım sağlayabilmektedirler. Bu uygulamada, Google Servisleri kullanılarak, kullanıcıların atık bildirimi yaptıkları noktaların konum bilgileri, longitude ve altitude olarak alınarak veritabanına kaydedilmektedir. Böylece yapılacak rota planlaması haritasının çıkarılmasına olanak sağlanmaktadır. Ayrıca Google, dünya çapında coğrafi veri sağlayıcıları ve kamu kurumları ile iş birliği yaparak haritalama verilerini toplar ve günceller. Bu veriler, yollar, binalar, doğal özellikler ve diğer coğrafi unsurlar hakkında detaylı bilgi sağlar. Hatta makine öğrenmesi gibi yöntemler kullanılarak bu bilgilerin daha yüksek doğrulukla kestirilmesi sağlanmaktadır. Taşıma sektöründe Google Maps API kullanımı trafik yoğunluğunu da hesaba katarak hesaplama yapmayı sağlayarak zamandan ve yakıttan tasarruf sağlamaktadır (Zhou et al., 2020).

3.2 Distance Matrix API İşlemleri

Akıllı şehir sistemleri içerisinde ve akıllı ulaşım uygulamalarında sıklıkla kullanılan Google Distance Matrix API, iki nokta ya da daha fazla varış konumları arasındaki mesafeleri ve yolculuk sürelerini hesaplamak üzere çalışan bir web hizmetidir. Bu hizmet, farklı ulaşım modlarını örneğin araç, yaya, bisiklet ve toplu taşıma gibi destekleyerek kullanıcılara en uygun güzergâh hizmetini sağlamaktadır (Google Developers, 2023). Atık yönetiminin akıllı bir sistem olarak planlandığı uygulamalarda, kentsel planlama ve özellikle lojistik gibi alanlarda rota optimizasyonu için önemli bir araçtır (Aldaihani ve Abbod, 2018).

Google Mesafe Matrisi Hizmetinin en çarpıcı özelliklerinden biri, dinamik trafik verilerini etkin bir şekilde kullanabilmesidir. Gerçek zamanlı trafik yoğunluğu ön plana alınarak hesaplanan mesafeler ve süreler, statik yöntemlerle gerçekleştirilen geleneksel hesaplamalara göre gerçekçi sonuçlara ulaşmamızı sağlarken, özellikle yoğunluğun yüksek olduğu kentlerde operasyonel verimliliği artırmaktadır (Pettit et al., 2017). Yanı sıra, aynı anda birden çok başlangıç ve hedef arasında mesafe hesaplamasına olanak sağlaması avantajını bünyesinde barındırdığından büyük ölçekli optimizasyon uygulamalarında kullanılabilmektedir. Buradan yola çıkarak Google Mesafe Matrisi Hizmeti, bu çalışmaya konu olan rota optimizasyonunda ihtiyaç duyulan konumlar arası mesafelerin alınabileceği en iyi hizmet olarak görülmektedir.

4. GENETİK ALGORİTMA ile ROTA OPTİMİZAZYONU

Bu çalışmada, atık konumları arasındaki toplam en kısa mesafeye sahip rota optimizasyonu için Genetik Algoritma (GA) kullanılmıştır. GA, doğadan ilham alan sezgisel bir optimizasyon yöntemidir. İlk kez 1975 yılında John Holland tarafından açıklanan bu algoritma, biyolojik evrimin temel prensipleri olan doğal seçilim, çaprazlama (crossover) ve mutasyonu (mutation) taklit ederek çözüme ulaşmayı amaçlar. GA büyük ve karmaşık çözüm uzaylarında yaklaşık en iyi çözümleri bulmak için sıklıkla tercih edilir (Holland, 1975). GA özellikle gezgin satıcı problemi (TSP), araç rotalama, görev atama, makine zamanlama ve yapay zekâ alanlarında kullanılmaktadır. Genetik algoritma aşağıdaki temel adımlardan oluşur:

Başlangıç Popülasyonu (Initial Population): Çözüm uzayından rastgele veya belirli bir dağılıma göre seçilmiş bireylerden (kromozomlardan) oluşan bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Her birey olası bir aday çözümü temsil eder.

Uygunluk Değerlendirmesi (Fitness Evaluation): Her bireyin uygunluğu, problemi çözme başarısını ölçen bir maliyet fonksiyonu yardımıyla hesaplanır. TSP özelinde bu genellikle toplam yol uzunluğunun tersidir.

Seçilim (Selection): Uygunluğu yüksek bireyler, bir sonraki nesile aktarılmak üzere seçilir. Turnuva seçimi, rulet tekerleği veya sıralı seçim gibi seçim yöntemleri kullanılır. Bu çalışmada rulet tekerleği seçimi kullanılmıştır.

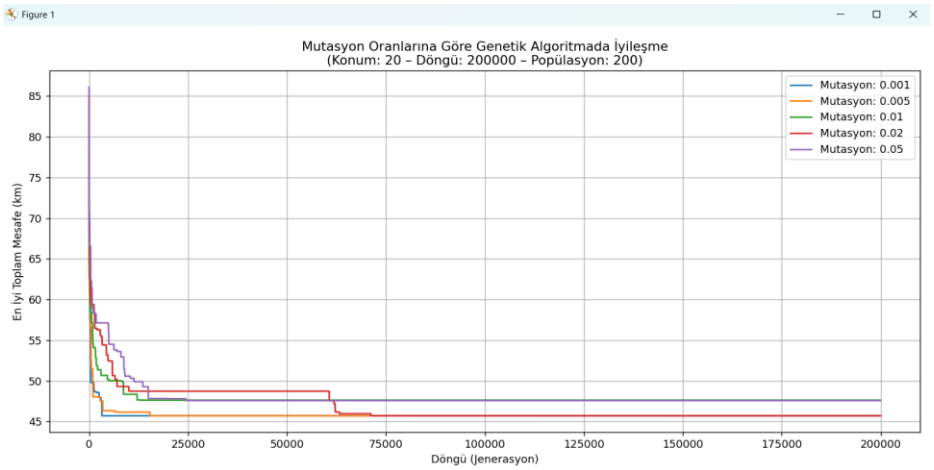
Çaprazlama (Crossover): Seçilen iyi bireylerin genetik bilgileri birleştirilerek olası daha iyi yeni bireyler (çocuklar) oluşturulur. Çocukların ebeveynlerinden daha iyi çözüm üretmesi beklenir iken tersi de mümkündür.

Mutasyon: Çocuk bireylerin bazı genleri belirli bir olasılıkla değiştirilerek çeşitlilik sağlanır. TSP'de bu genellikle iki noktanın yer değiştirmesi (swap), ters çevrilmesi (inversion) veya kaydırılması (scramble) ile yapılabilir.

Sonlandırma Kriteri: Belirli bir nesil sayısına ulaşıldığında veya çözümün artık iyileşme göstermemesi durumunda algoritma sonlandırılır. Algoritma sonlandırılıncaya kadar seçilim, çaprazlama ve mutasyon adımları tekrarlanır.

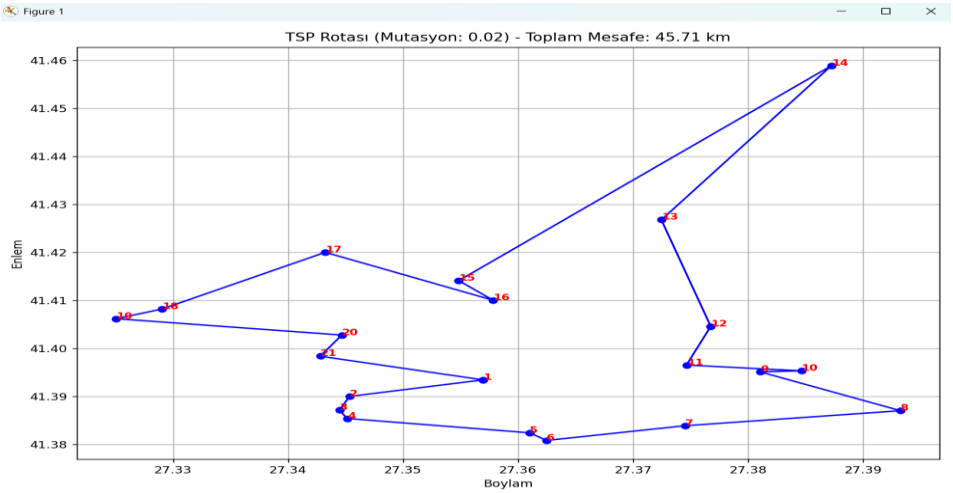
Bu çalışmada, GA ile, bildirimi yapılan konumlardan geçen rota optimize edilmektedir. Her nokta yalnızca bir kez ziyaret edilmekte ve rota sonunda başlangıç noktası yani atık depolama tesisine dönüş yapılmaktadır. Amaç, her noktayı bir kez ziyaret ederek en kısa rotayı bulmak olarak belirlenmiştir. Bireyler, kullanıcıların yaptığı bildirimlerdeki konumlardan oluşmaktadır. Konumlar arasındaki mesafe verileri, Google Distance Matrix API'den alınarak hesaplamalar yapılmaktadır. Bu yöntem çalışmaya esneklik katarak günlük hayattaki yol çalışmaları, kapalı yollar, alternatif güzergahların en efektif şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Böylece rota her zaman ve her şartta en kısa güzergahta hazırlanmaktadır.

20 konumlu bir rota planlaması için farklı popülasyon büyüklükleri ve mutasyon oranlarında GA çalıştırılmıştır. En iyi sonuca popülasyon büyüklüğü 200 ve mutasyon oranı 0.001 iken ulaşılmıştır. Şekil 3'te, 20 konumlu problemin 200 popülasyon büyüklüğü ve 0,001 mutasyon oranı ile çözümü görülmektedir. Yaklaşık 5000 jenerasyonda çözüm sağlanmıştır ve toplam rota uzunluğu yaklaşık 45.71 km olarak bulunmuştur.



Şekil 3. 20 Konum İçin Mutasyon Oranlarının Jenerasyon Boyunca Etkisi

Şekil 4'te bildirimi yapılan 20 konum için oluşturulan rota gösterilmektedir. Rota incelendiğinde, konumlar arası çapraz geçişlerin olmayışı GA'nın optimum sonucu bulduğu anlamına gelmektedir. Şekil, konumlar arsında kuş bakışı çizimleri göstermekte olup; tek yön, trafiğe kapalı yol ve eğimli arazi bilgilerini göstermemektedir. Ek olarak, rota bir depodan başlayıp yine aynı depoya geri dönerek tam bir tur tamamlamaktadır.



Şekil 4. 20 Popülasyon İçin En İyi Rota

5. SONUÇ

Çalışmada, akıllı şehirler kapsamında bir mobil uygulama ve GA içeren düzensiz atık yönetim sistemi geliştirilmiştir. Mobil uygulama vatandaşların düzensiz atıklarının konumu, türü ve miktarının yerel yönetimlere bildirimi için geliştirilmiştir. Bildirimler yerel yönetim tarafında bir veritabanında kaydedilmektedir. Veritabanındaki bildirim konumları GA ile optimize edilerek en düşük maliyetle atıkların toplanması sağlanmaktadır. Konumlar arasındaki mesafe verileri, Google Distance Matrix API'den alınarak hesaplamalar yapılmaktadır. Örnek olarak, 20 konumlu bir rota planlaması için farklı popülasyon büyüklükleri ve mutasyon oranlarında GA çalıştırılmıştır. En iyi sonuca popülasyon büyüklüğü 200 ve mutasyon oranı 0.001 iken ulaşılmıştır. Yaklaşık 5000 jenerasyonda çözüm sağlanmıştır ve toplam rota uzunluğu yaklaşık 45.71 km olarak bulunmuştur. GA tabanlı optimizasyon yaklaşımı, akıllı şehirler için düzensiz atık toplama işinin, günümüzde hala yoğunlukla kullanılan geleneksel yöntemlerden ayrışarak teknolojik uygulamaları kullanarak etkili bir çözüm sunmuştur. GA'nin rota planlamasındaki başarısı sayesinde her şartta yüksek kaliteli çözümler sağlanmıştır. Geliştirilen model atık toplama rotalarını optimize ederek zaman, toplam mesafe, operasyonel maliyetler gibi konularda karlılık sağlarken ek bir fayda olarak daha çevreci bir sürece doğru yönelttiği sonucuna varılmaktadır.

KAYNAKLAR

Aldaihani, M. M., & Abbod, M. F. (2018). A review of routing optimization using Google Maps and Distance Matrix API. International Journal of Computer Applications, 180(27), 1–6.

Alourani A, Ashraf MU, Aloraini M. 2025. Smart waste management and classification system using advanced IoT and AI technologies. PeerJ Computer Science 11:e2777 https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2777

Cicala, L.; Gargiulo, F.; Parrilli, S.; Amitrano, D.; Pigliasco, G. Progressive Monitoring of Micro-Dumps Using Remote Sensing: An Applicative Framework for Illegal Waste Management. Sustainability 2024, 16, 5695.

Das, S., & Bhattacharyya, B. K. (2015). Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes. *Waste Management, 43*, 9–18.

Fujdiak, R., Masek, P., Mlynek, P., Misurec, J., & Olshannikova, E. (2016). Using Genetic Algorithm for Advanced Municipal Waste Collection in Smart City. 2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), IEEE.

Google Developers. (2023). *Distance Matrix API documentation*.https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix

Kaçtıoğlu, S., Şengül, Ü. (2010). Erzurum Kenti Ambalaj Atıklarının Geri Dönüşümü İçin Tersine Lojistik Ağı Tasarımı ve Bir Karma Tam Sayılı Programlama Modeli. Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 24, 1

Karadimas, N. V., Papatzelou, K., & Loumos, V. G. (2007). Genetic algorithms for municipal solid waste collection and routing optimization. In IFIP International Federation for Information Processing (pp. 223–232). Springer.

Medina-Medina, A. J., Salas Lopez, R., Barboza, E., Tuesta-Trauco, K. M., Zabaleta-Santiesteban, J. A., Guzman, B. K., Oliva-Cruz, M., Tariq, A., & Rojas-Briceno, N. B. (2024). Participation GIS for the monitoring of areas contaminated by municipal solid waste: A case study in the city of Pedro Ruiz Gallo (Peru). Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 10, 100941.

Melo, A. B., Oliveira, A. M., de Souza, D. S., & da Cunha, M. J. (2017). Optimization of garbage collection using genetic algorithm. *2017 IEEE 14th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*, 665–672.

Holland, J. H. (1975). Adaptation in Natural and Artificial Systems. The University of Michigan Press.

Pettit, C., Bakelmun, A., Lieske, S. N., Glackin, S., Hargroves, K., Thomson, G., Dia, H., & Newman, P. (2017). Planning support systems for smart cities. *City, Culture and Society*, 12, 13–24.

Saha, S., & Chaki, R. (2023). IoT based smart waste management system in aspect of COVID-19. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 9(100048).

UNEP & ISWA (2015). *Global Waste Management Outlook*. United Nations Environment Programme & International Solid Waste Association.

UN-Habitat. (2010). Solid Waste Management in the World's Cities: Water and Sanitation in the World's Cities 2010. Earthscan for UN-Habitat.

Viotti, P., Polettini, A., Pomi, R., & Innocenti, C. (2003). Genetic algorithms as a promising tool for optimisation of the MSW collection routes. Waste Management & Research, 21(4), 292–298.

Vu, H. L., Ng, K. T. W., & Bolingbroke, D. (2018). Parameter interrelationships in a dual phase GIS-based municipal solid waste collection model. Waste Management, 78, 258–270.

Zhou, Y., Wang, Y., & Li, Q. (2020). Route optimization in urban logistics using Google Maps API. *Sustainability*, 12(18), 7429.

PERFORMANCE IMPACT OF TEMPORAL FILTERING ON UWB POSITIONING SYSTEMS UNDER NLOS CONDITIONS

KAAN ERKAN
Trio Mobil, R&D Department
kaan.erkan@triomobil.com, ORCID: 0000-0003-0477-7143

NİYAZİ NADİ SÜMER
İstanbul Medeniyet University, Electrical and Electronics Engineering Department /
Trio Mobil, R&D Department
niyazinadisumer@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9691-3653

MURAT YILDIRIM
Trio Mobil, R&D Department
murat.yildirim@triomobil.com, ORCID: 0009-0007-9785-8458

MURAT ZENGİN
Trio Mobil, R&D Department
murat.zengin@triomobil.com, ORCID: 0009-0001-7253-5843

Prof. Dr. OĞUZHAN URHAN
Kocaeli University, Electronics and Communication Engineering Department
urhano@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0352-1560

Abstract

Ultra-Wideband (UWB) technology has emerged as a leading solution for positioning applications due to its high temporal resolution and robustness against multipath effects. However, in Non-Line-of-Sight (NLOS) scenarios where the direct line of sight between the transmitter and receiver is obstructed, UWB systems suffer from increased measurement errors and unstable position estimates, significantly degrading overall performance. This study investigates a temporal filtering-based approach to mitigate NLOS effects and enhance positioning accuracy under such challenging conditions. Two experimental setups were designed for evaluation: one in a static environment and one in a dynamic environment. In both scenarios, UWB-based range measurements were collected and analyzed. A Kalman filter was applied to improve the measurement data, and a state model was developed to capture the system's dynamic characteristics. Experimental results demonstrate that the Kalman-based temporal filtering method significantly improves positioning performance in both static and dynamic scenarios. In particular, under conditions where NLOS effects are pronounced, improvements in localization accuracy of 11% in dynamic scenarios and 35% in static scenarios were observed after filtering. These findings indicate that temporal filtering can serve as an effective enhancement tool for UWB-based positioning systems.

Keywords: Ultra Wide Band Positioning, NLOS, Kalman Filter

1. INTRODUCTION

Ultra-Wideband (UWB) technology offers high accuracy in positioning applications thanks to its high bandwidth (>500 MHz) and nanosecond-level time resolution (Gezici et al., 2009; Win and Scholtz, 1998). Its short pulse structure and wide spectrum usage increase the robustness of UWB signals against multipath effects, thereby providing better performance, especially for indoor positioning applications, compared to other wireless technologies like Wi-Fi and Bluetooth Low Energy (BLE) (Alarifi et al., 2016; Dardari et al., 2009).

However, one of the biggest challenges for UWB-based positioning systems is the significant performance drop in Non-Line-of-Sight (NLOS) conditions, where the direct line of sight is obstructed (Patwari et al., 2005). In NLOS situations, the signal must travel around obstacles, leading to errors in range/distance measurements and increased uncertainty in position estimates, thereby reducing the system's positioning accuracy (Gu et al., 2009). In critical areas such as industrial applications, warehouse management, robotic systems, and forklift safety, these issues pose a potential threat to system reliability (Zafari et al., 2019).

Various approaches have been developed in the literature to overcome these challenges. Temporal filtering techniques, in particular, are widely used to increase the stability of position estimates by reducing measurement noise and NLOS-induced deviations (Li et al., 2017; Zhou et al., 2018). The Kalman filter is also frequently preferred in such situations because it can improve performance in both static and dynamic environments by conforming to the system's dynamic models (Simon, 2006).

In this study, a two-stage Kalman filter-based temporal filtering approach is proposed to reduce noise and sudden jumps caused by NLOS in UWB-based range measurements. In the first stage, raw range data is smoothed with a Kalman filter; then, using this data, the intersection points of the circles for localization are calculated, and outliers among the calculated intersection points are removed by excluding measurements outside the threshold values calculated using the median value and Median Absolute Deviation (MAD) of the data set. The average of the remaining intersection points is taken to obtain the initial position estimate. In the final stage, this position estimate is stabilized by a second Kalman filter to account for the temporal relationship. The proposed approach was tested in both static and dynamic experimental environments, and the results showed a significant increase in localization accuracy under NLOS conditions.

2. FILTERING APPROACH AND STATE MODEL

The measurement processes in UWB-based positioning systems consist of three sequential steps: range calculation, geometric position extraction, and temporal refinement. In this study, a two-stage filtering structure was implemented to reduce sudden jumps and discontinuities caused by NLOS and multipath effects. As shown in Figure 1, the filtering architecture consists of a range filter, geometric position generation, median-based outlier suppression, average position calculation, and position-level Kalman filter stages, respectively. The Kalman filter is used to estimate a more stable position by combining the raw range measurements from all anchors with the calculated positions.

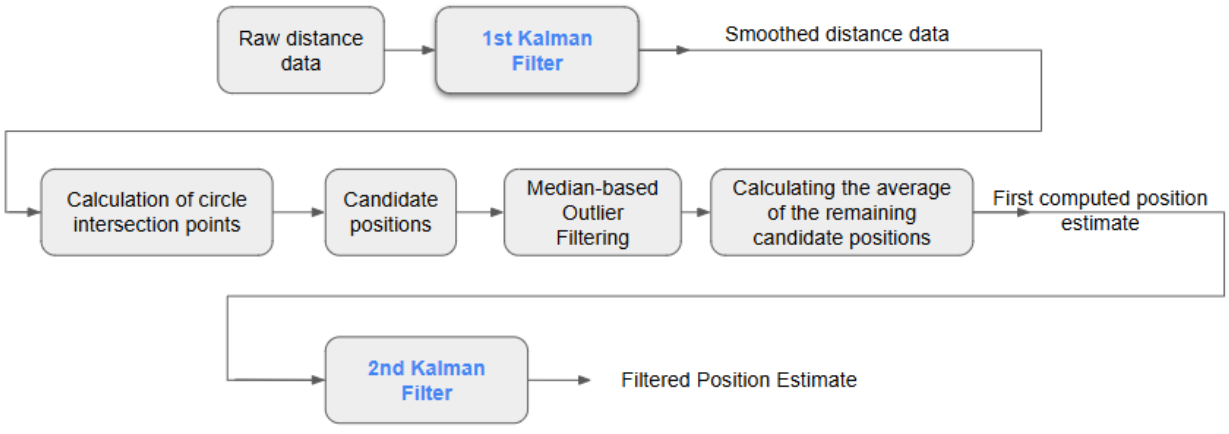


Figure 1. Filtering Architecture

2.1. Temporal Kalman Filter at Range Level

Raw range measurements z_k received from UWB anchors contain sudden jumps and measurement noise. Therefore, a single-variable Kalman filter was applied for each anchor–tag distance in the first stage. This filter ensures that the measurements are temporally smoothed and that the distances used in the position calculation are stabilized. In the Kalman filter used in this study, z_k represents the measured distance.

The process noise covariance Q and measurement noise covariance R used in the Kalman filter were determined by analyzing variance in UWB anchor–tag range measurements. The analysis results showed that using a fixed covariance value for both noise terms is sufficient for the application. Therefore, Q and R were treated as scalar values within the single-variable Kalman filter, and Q=1.0 and R=1.0 were used in experimental studies. Process noise Q represents the uncertainties in system dynamics, while measurement noise R defines sensor-induced errors in UWB range measurements.

Among the quantities calculated by the Kalman filter P_k is the covariance/uncertainty, expressing the total uncertainty caused by the noise. K_k is the Kalman gain, which determines the extent to which the measurement affects the estimate and d_k is defined as the filtered/smoothed distance. The flow chart of the Kalman filter is shown in Figure 2. The state variable consists only of the distance, as in Equation (1).

$$d_k = d_{k-1} + w_k\,, \qquad w_k \sim N(0, Q) \tag{1}$$

The measurement model is given in Equation (2).

$$z_k = d_k + v_k\,, \qquad v_k \sim N(0, R) \tag{2}$$

Here, w_k represents the process noise and v_k represents the measurement noise. Both terms are modeled as zero-mean white Gaussian noise, and their covariances are defined by the scalar values Q and R.

The Kalman filter consists of initialization, prediction, Kalman gain calculation, and update steps. The initial values are set as $P_0 = 1.0,\ d_0 = z_0$. In the prediction step, the total uncertainty is calculated as shown in Equation (3).

$$P_k^- = P_{k-1} + Q \tag{3}$$

In the next step, the Kalman gain specified in Equation (4) is calculated using the predicted covariance value $P_k{}^-$ and the measurement noise R.

$$K_k^- = P_k^-(P_k^- + R)^{-1} \tag{4}$$

In the update step, the state variable d_k (the filtered/smoothed distance between the anchor–tag) is updated using the state estimate d_{k-1} obtained in the previous step and the Kalman gain K_k, as in Equation (5). Here, d_{k-1} is the same as the pre-measurement state estimate at time k, d_k^- , due to the random walk model ($d_k^- = d_{k-1}$). Similarly, the covariance/uncertainty term P_k is also updated using the Kalman gain as shown in Equation (6).

$$d_k = d_{k-1} + K_k(z_k - d_{k-1}) \tag{5}$$

$$P_k = (1 - K_k)P_k^- \tag{6}$$

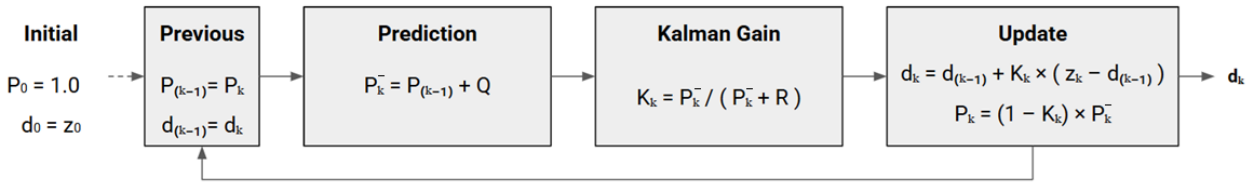


Figure 2. Kalman Filter Flow Chart

2.2. Geometric Position Extraction (Circle Intersections)

The smoothed distance values obtained after the first Kalman filter application form the radii of the circles centered at each anchor. At this stage, possible circle intersection points are calculated for each anchor pair, provided that the anchor positions are fixed. Each anchor pair geometrically produces two possible intersection points, and depending on the structure of the experimental area, some pairs may create points that do not represent the proper position due to NLOS effects.

The intersection points were calculated according to the classical two-circle intersection formula, and possible position sets were obtained for all anchor pairs. However, NLOS-induced deviations can significantly move some of these points away from the set. For this reason, the candidate positions obtained after the circle intersection are not used directly for position estimation.

The circle equations are given in Equation (7), starting from each anchor position (x_i, y_i) and the smoothed distance value d_i.

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2 \tag{7}$$

The intersection points ($(x_{ij}^{(1)}, y_{ij}^{(1)}), (x_{ij}^{(2)}, y_{ij}^{(2)})$) are calculated for each anchor pair. The set of all geometrically possible positions is defined as: $C = \{(x_{ij}, y_{ij}) \mid i < j\}$

2.3. Median-Based Outlier Removal and Filtering of Possible Positions

All candidate positions obtained from the intersection points were treated as a set, and points that were significantly distant from each other were filtered out using a median-based pruning filter. The objective at this stage is to remove erroneous extreme values (outliers) caused by the NLOS effect from the position set. In this approach, median values were calculated separately for each axis (x and y); points that fell outside a specified threshold relative to the median were considered invalid. Thus, a valid point set containing only geometrically close, consistent, and physically reasonable positions was obtained. As a result of this process, a reliable candidate-point distribution that contributes to the position estimation has been created.

2.4. Initial Position Estimation with the Average of Valid Intersections

The valid positions remaining after the median filter form a cluster, with points near the correct position concentrated. Therefore, the initial position estimate was calculated as the arithmetic mean of the points in this set. This approach both facilitates the selection of the correct one of the two symmetrical solutions that emerge after the circle intersection and provides a smoother position estimate by reducing the remaining noise. The position value obtained is an initial estimate that suppresses high-frequency noise in the position space.

2.5. Second Kalman Filter at Position Level

A second Kalman filter was applied because the initial position estimate could still exhibit sudden temporal changes. This filter aims to smooth the position (x, y) components directly over time and to track the position more stably in dynamic scenarios.

At this stage, the system uses a two-dimensional state vector: $D_k = [\, x_k \;\; y_k]$. The system model is defined as a random walk, assuming that position changes slowly over time, and is given in Equation (8).

$$D_k = D_{k-1} + w_k\,, \qquad w_k \sim N(0, Q) \tag{8}$$

The measurement model consists directly of the initial position estimate values obtained by averaging the valid intersections, as given in Equation (9).

$$Z_k = D_k + v_k\,, \qquad v_k \sim N(0, R) \tag{9}$$

In the Kalman filter, the initial values $P_0 = I_2,\ D_0 = Z_0$ are taken. The process noise Q in the prediction step is chosen as a constant $0.5(I_2)$ based on experimental variance analysis. The total uncertainty due to noise is given in Equation (10). The P_{k-1} value is updated with the P_k value calculated in the update step to form the new P_k value.

$$P_k^- = P_{k-1} + Q \tag{10}$$

In the next step, the Kalman gain specified in Equation (11) is calculated using the updated P_k^- value and the measurement noise R, which is taken as a constant $3.0(I_2)$ based on experimental variance analysis.

$$K_k^- = P_k^-(P_k^- + R)^{-1} \tag{11}$$

In the update step, the position vector D_k created by the Kalman filter and the P_k updated with the Kalman gain are calculated as shown in Equations (12) and (13).

$$D_k = D_k^- + K_k(Z_k - D_k^-) \tag{12}$$

$$P_k = (I_2 - K_k)P_k^- \tag{13}$$

The Kalman filter used at this stage has improved the temporal continuity of the position by reducing inconsistencies between consecutive measurements, especially in dynamic scenarios. The position values obtained in this second stage are the final outputs used in the performance comparisons presented in the experimental results section.

3. EXPERIMENTAL RESULTS

This section examines the performance of the proposed two-stage temporal filtering approach in static and dynamic experimental environments. UWB-based raw range data, geometric position candidates generated from circle intersections, and final filtered position results were comparatively analyzed in both static and dynamic scenarios. The findings show that measurement noise and sudden jumps are systematically suppressed, resulting in significant improvements in position accuracy, especially in industrial environments dominated by NLOS conditions. In the experiments, four anchors and one tag were used, and an average of 590 UWB range measurements were obtained for each anchor–tag pair.

In the static test environment shown in Figure 3, the tag position was kept fixed, and significant measurement errors occurred due to the NLOS condition behind the column. When the raw data were examined, it was observed that sudden jumps, especially in the anchor–tag distances, caused a wide distribution of circle intersections. Without filtering, an accuracy of only 39.54% was achieved in the ±50 cm accuracy band and 63.09% in the ±100 cm band.

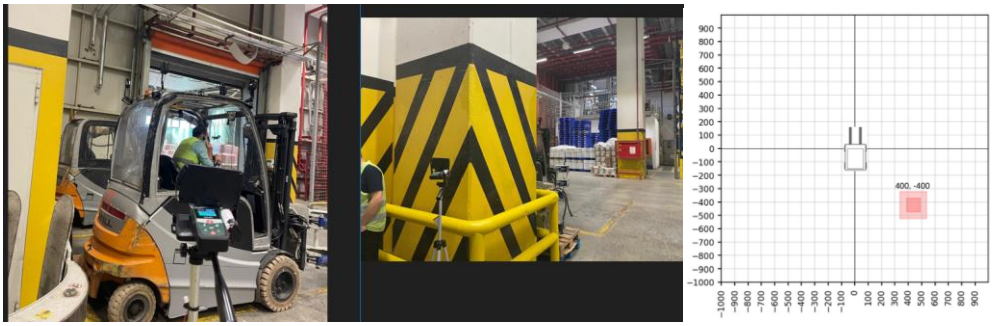


Figure 3. Environment and placement of Test 1 (Static condition, behind the column, NLOS)

When the smoothing of distances with the first Kalman filter, the elimination of geometric outliers with the median filter, and the Kalman filter at the position level in the final stage are considered together, the accuracy values increase significantly. With all filters active, an accuracy of 74.82% in the ±50 cm accuracy band and 98.2% in the ±100 cm band was achieved.

These results indicate that filtering is more effective in the static environment due to the stationary nature of the NLOS effect. The constant noise characteristic over time facilitated the stable reduction of uncertainty by the Kalman filters, and the median-based pruning effectively excluded inconsistent geometric solutions. The overall improvement rate in the static scenario is 35.28%.

In the dynamic scenario given in Figure 4, the tag was moved along a specific route, and LOS–NLOS transitions occurred during the test. Due to movement, the noise structure in the system changed over time; NLOS-induced distance elongations were pronounced, especially during transitions behind the shelves. Without filtering, accuracies of 36.64% and 60.25% were achieved in the ±50 cm and ±100 cm bands, respectively.

When the proposed filtering structure was applied, the Kalman filter at the range level reduced the occurrence of sudden jumps. The median filter prunes geometrically erroneous position sets. The second Kalman filter at the position level provided temporal stability by modeling movement continuity. With all filters actively used, the accuracy values in the dynamic scenario increased to 48.03% in the ±50 cm band and 78.19% in the ±100 cm band. This corresponds to a significant improvement of 11.39% compared to the raw data.

The reason for the lower improvement rate in the dynamic environment compared to the static environment is the simultaneous occurrence of NLOS effects and movement speed, and the generation of discontinuous noise in the measurements. Under these conditions, the circle-intersection-based approach used for the initial position estimate yields greater variance depending on the anchor line-of-sight during movement. However, applying the second Kalman filter significantly reduced this variance, thereby improving tracking performance.



Figure 4. Environment and placement of Test 2 (Dynamic condition, behind the shelf, NLOS)

The results show that the proposed two-stage Kalman-based temporal filtering structure yields a significant performance improvement in UWB-based positioning systems under static and dynamic conditions. When the smoothing of range measurements corrupted by NLOS, median-based geometric pruning, and the second-stage Kalman filter at the position level are considered together, the system becomes more stable and reliable for real-time applications such as industrial warehouses, robotic transportation systems, and forklift safety.

Comparative test results are presented in Table 1. An improvement of 35% in the static environment and 11% in the dynamic environment has shown that temporal filtering is a strong complementary method for UWB-based positioning. This study demonstrates that even under conditions dominated by high noise and NLOS effects, UWB performance can be significantly improved by software-based optimization techniques.

Table 1. Test Results

Result	Filter Status			Static Condition Success Rate (%)		Dynamic Condition Success Rate (%)	
	Range Kalman	Median	Position Kalman	+/- 50 cm	+/- 100 cm	+/- 50 cm	+/- 100 cm
1	Off	Off	Off	39,54	63,09	36,64	60,25
2	Off	On	Off	49,04	81,96	38,52	67,98
3	On	Off	On	57,19	94,39	41,98	75,12
4	On	On	On	74,82	98,2	48,03	78,19

4. DISCUSSION

The proposed two-stage Kalman filter-based temporal filtering approach in this study provided effective results in reducing NLOS-induced measurement errors and increasing position estimation accuracy in UWB-based positioning systems. The 35% performance improvement in the static scenario indicates that the filtering is highly effective due to the system's relatively constant noise characteristics in stationary environments. The increased complexity of measurement noise can explain the 11% improvement rate in the dynamic scenario, driven by the system's dynamic nature and sudden NLOS transitions. Nevertheless, these rates offer significant performance gains in practical applications.

Specifically, the Kalman filter at the range level successfully reduced sudden measurement jumps, while the median-based outlier removal mechanism limited the effect of geometrically inconsistent points. The second Kalman filter at the position level provided a more stable tracking capability by suppressing temporal inconsistencies in the moving system. When these stages are evaluated together, it can be said that the proposed methods are complementary and establish a robust positioning infrastructure for industrial applications.

However, the study has some limitations and potential for development. The filter structure is based on the classic linear Kalman filter, and the linear assumptions hold in the system model. However, NLOS and multipath effects in UWB-based positioning systems often involve non-linear and time-dependent variations. At this point, applying advanced filtering techniques that better represent non-linear state models, such as the Extended Kalman Filter (EKF) or Unscented Kalman Filter (UKF), can further increase positioning performance. EKF, in particular, is widely used for approximately modeling non-linear system dynamics and UKF offers superiority in accuracy by providing more accurate statistical estimates.

Furthermore, integrating sensor fusion approaches with IMU (Inertial Measurement Unit) sensors in dynamic scenarios can offer higher accuracy and stability than systems based solely on UWB data. IMU

data enables filtering algorithms to operate more effectively by ensuring position continuity, especially under short-term NLOS conditions. In future studies, experimental evaluation of such hybrid positioning solutions and comparison with EKF/UKF-based algorithms would be beneficial.

In conclusion, the proposed two-stage Kalman filter approach offers a suitable and applicable solution, especially for industrial environments with high noise and intense NLOS effects. This study has once again shown the importance of software-based improvement techniques in UWB systems and has laid a solid foundation for research into more advanced methods in system modeling and filter design.

REFERENCES

ALARIFI A., Al-Salti F., Al-Ammar M., Al-Khalifa H., Alnafessah A., Alhadhrami S., Al-Sarawi S., Basalamah S. (2016), *Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances,* Sensors, 16(5), 707.

DARDARI D., Conti A., Ferner U., Giorgetti A., Win M.Z. (2009), *Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments,* Proceedings of the IEEE, 97(2), 404–426.

GEZICI S., Tian Z., Giannakis G.B., Kobayashi H., Molisch A.F., Poor H.V., Sahinoglu Z. (2005), *Ultra-wideband positioning systems: Theoretical limits, practical algorithms, and future challenges,* Proceedings of the IEEE, 97(2), 386–403.

GU Y., Lo A., Niemegeers I. (2009), *A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks,* IEEE Communications Surveys & Tutorials, 11(1), 13–32.

LI B., Salido-Monzú D., Dempster A.G. (2017), *Indoor Positioning System Using UWB and Kalman Filter to Improve Accuracy,* IEEE Sensors Journal, 17(13), 4276–4285.

PATWARI N., Ash J.N., Kyperountas S., Hero A.O., Moses R.L., Correal N.S. (2005), *Relative location estimation in wireless sensor networks,* IEEE Transactions on Signal Processing, 53(8), 3015–3028.

SIMON D. (2006), *Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches,* Hoboken: Wiley.

WIN M.Z., Scholtz R.A. (1998), *Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications,* IEEE Transactions on Communications, 48(4), 679–689.

ZAFARI F., Gkelias A., Leung K.K. (2019), *A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies,* IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(3), 2568–2599.

ZHOU H., Li B., Dempster A.G. (2018), *Kalman Filter-Based High-Accuracy Indoor Positioning With NLoS Error Mitigation,* IEEE Transactions on Vehicular Technology, 67(1), 882–892.

ASKERİ HAVACILIK SİSTEMLERİ İÇİN YÜKSEK GÜÇ YOĞUNLUKLU DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI

ALTUĞ OZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
altugozkan1998@gmail.com, ORCID: 0009-0001-7758-5866

Prof. Dr. ATİYE HÜLYA OBDAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
obdan@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6578-0293

Arş. Gör. Dr. ABDÜLKERİM GÜNDOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
kerimg@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2244-4342

Özet

Askeri havacılık sistemlerinde enerji dönüşümü; sistemlerin güvenli, kararlı ve yüksek verimli çalışabilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, askeri havacılık platformlarına yönelik ve MIL-STD-704 standardına uygun bir DC-DC (doğru akım) dönüştürücünün tasarlanması hedeflenmiştir. Öncelikli tasarım hedefleri; anahtarlama elemanlarının üzerindeki gerilim stresinin düşürülerek daha düşük gerilim sınıfında anahtar kullanılabilmesi, akım zorlanmasının azaltılarak termal performansın iyileştirilmesi ve bu düzenlemeler sonucunda dönüştürücünün verimi ile güç yoğunluğunun artırılmasıdır. Tasarım hedefleri doğrultusunda, aynı çalışma koşullarında tek anahtarlı ileri yönlü (TAİY) ve iki anahtarlı ileri yönlü (İAİY) dönüştürücü topolojileri karşılaştırılmıştır. İAİY dönüştürücüde anahtarların maruz kaldığı maksimum gerilim stresi yaklaşık giriş gerilimi ($V_{giriş}$) seviyesinde sınırlanırken, TAİY dönüştürücüde maksimum gerilim stresi yaklaşık $2.6xV_{giriş}$ mertebesine kadar yükselir. İAİY dönüştürücüde, iki kenetleyici diyot sayesinde transformatörün mıknatıslama endüktansında biriken enerji sıfırlandığı için ek bir resetleme sargısına ya da bastırma devresine ihtiyaç duyulmaz. İAİY dönüştürücüde, transformatörün kaçak endüktansına bağlı olarak oluşan ani gerilim yükselmeleri kenetleyici diyotlar üzerinden sönümlenir. Ayrıca, kaçak endüktanstan kaynaklanan salınımlar neredeyse tamamen ortadan kalktığı için devredeki gürültü azalır ve böylece kayıplar düşer, verim artar. İAİY dönüştürücü; yüksek giriş gerilimleri ve yüksek çıkış güçleri için daha uygun bir çalışma aralığı sunarken, devre yapısının sadeliği uygulamayı kolaylaştırır. Karşılaştırma sonucunda, İAİY topolojinin avantajları belirgin şekilde ortaya çıkmıştır ve askeri havacılık uygulamaları için İAİY topolojinin, TAİY topolojiye göre daha uygun bir seçenek olduğu gözlemlenmiştir. 270 V DC giriş gerilimi, 28 V DC çıkış gerilimi ve 560 W çıkış gücü için tasarlanan TAİY ve İAİY dönüştürücüler, tasarımın hedeflenen çıkış koşullarını sağladığının doğrulanması ve performanslarının değerlendirilmesi amacıyla MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tasarlanan dönüştürücülerin standartta belirtilen 270 V DC giriş hattında çalıştırıldığında, 28 V DC çıkış gerilimini tasarım hedeflerine uygun biçimde ürettiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: DC-DC dönüştürücü, tek anahtarlı ileri yönlü dönüştürücü, iki anahtarlı ileri yönlü dönüştürücü, yüksek güç yoğunluğu

DESIGN OF A HIGH POWER DENSITY CONVERTER FOR MILITARY AVIATION SYSTEMS

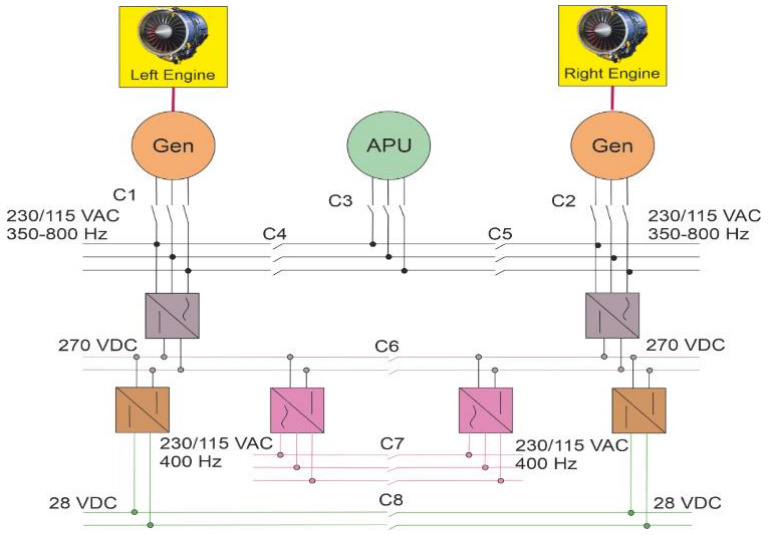
Abstract

Energy management plays a decisive role in the reliability and performance of modern military aircraft where power electronic converters must operate under demanding electrical conditions. This study focuses on the development of an isolated DC–DC converter designed to interface with the 270 V DC bus defined in MIL-STD-704 and to deliver the 28 V DC level required by onboard subsystems. The design targets include reducing the electrical and thermal stress on switching devices, improving efficiency, increasing power density and maintaining a compact and reduced-complexity circuit structure. To assess the suitability of different isolated converter structures, single-switch forward (SSF) and two-switch forward (TSF) topologies were examined under identical operating conditions. The TSF configuration constrains the maximum switch voltage to approximately the input level (V_{input}), whereas the SSF topology exposes the switch to nearly $2.6xV_{input}$. In the TSF converter, magnetizing energy is discharged through clamping diodes, removing the need for an additional reset winding or snubber circuit. These diodes also suppress voltage spikes induced by leakage inductance and this reduces oscillatory behavior, lowers losses and enhances overall efficiency. Due to these advantages, the TSF converter achieves a wider and more practical operating range for high voltage and high power applications. Converters designed for 270 V DC input voltage, 28 V DC output voltage and 560 W output power were modeled and simulated using MATLAB/Simulink to evaluate their steady-state performance. Simulation results confirm that the designed converters produce the required 28 V DC output when operated at the input voltage levels defined in MIL-STD-704.

Keywords: DC-DC converter, single-switch forward converter, two-switch forward converter, high power density

1. GİRİŞ

Elektriksel enerji dönüşümü, özellikle savunma ve havacılık uygulamalarında farklı gerilim seviyelerinde çalışan alt sistemlerin güvenli, verimli ve yüksek güç yoğunluğu ile beslenebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Askeri hava araçlarında yaygın olarak kullanılan 270 V ve 28 V DC gerilim hatları arasında enerji dönüşümü gerektiren çok sayıda yük bulunmaktadır. 270 V DC hattı, DC jeneratörler aracılığıyla doğrudan veya AC jeneratör çıkışlarının doğrultulmasıyla elde edilmekte; 28 V DC hattı ise genellikle bu yüksek gerilim seviyesinin bir DC-DC dönüştürücü ile düşürülmesi sonucu sağlanmaktadır [1–3]. Yüksek giriş gerilimi ve güvenlik gereksinimleri nedeniyle, bu dönüşümde elektriksel izolasyona sahip topolojilerin tercih edilmesi sistem bütünlüğü ve arıza yayılımının önlenmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Şekil 1'de, MIL-STD-704 standartına uyumlu tipik bir askeri hava aracının elektrik güç mimarisi gösterilmektedir [3].



Şekil 1. MIL-STD-704 standartına uyumlu tipik bir askeri hava aracının elektrik güç mimarisi [3]

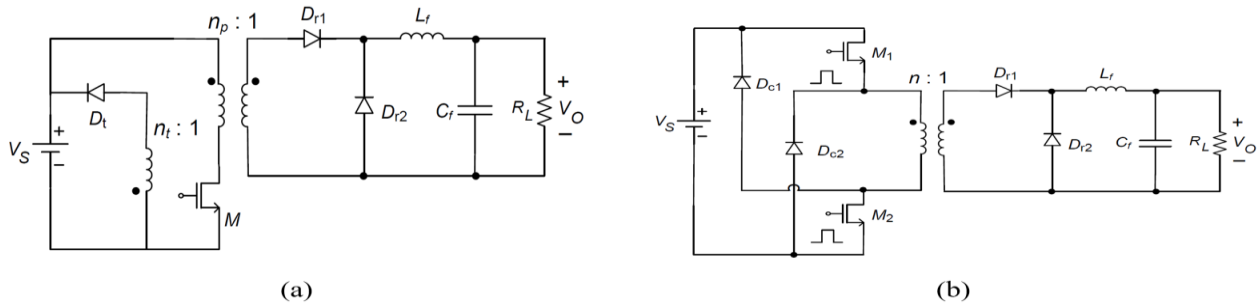
Güç yoğunluğunu artırma ve dönüştürücü verimliliğini iyileştirme amacıyla, literatürde yer alan çeşitli izoleli düşürücü dönüştürücü topolojileri incelenmiştir. Bu topolojiler genel olarak; rezonans temelli dönüştürücüler (LLC vb.), köprü tipi PWM dönüştürücüler (yarım köprü, tam köprü vb.) ve ileri yönlü dönüştürücü ailesi (tek anahtarlı, iki anahtarlı vb.) şeklinde sınıflandırılabilir [4–16]. Askeri havacılıkta 270 V DC gibi yüksek giriş gerilimlerinde; basit yapıları, yüksek güvenilirlikleri ve geniş kullanım alanları nedeniyle ileri yönlü tabanlı topolojiler öne çıkmaktadır. İki anahtarlı ileri yönlü (İAİY) dönüştürücü; anahtarlar üzerindeki düşük gerilim stresi, transformatörün mıknatıslama endüktansında biriken enerjinin iki kenetleyici diyot sayesinde sıfırlanması ile ek bir resetleme sargısına ya da bastırma devresine ihtiyaç duyulmaması, kaçak endüktans kaynaklı ani gerilim yükselmelerinin sönümlenmesi, devredeki gürültünün düşük olması, yüksek giriş gerilimleri ve çıkış güçleri için daha uygun olması gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Buna karşılık; tek anahtarlı ileri yönlü (TAİY) topoloji daha basit bir devre yapısına sahip olmakla birlikte, devrede tek anahtar kullanımı sebebiyle tek sürme devresi bulunduğu için kontrol devresinde kullanılan bileşen sayısı azalır [5-9].

Askeri hava aracı güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan 270 V DC besleme hattının 28 V DC gerilim seviyesine dönüştürülmesi gerekliliği, TAİY ve İAİY topolojilerinin aynı çalışma koşulları altında kapsamlı biçimde incelenmesini önemli hale getirmektedir. Literatürde bu dönüşüm için iki topolojinin karşılaştırıldığı çalışmalar sınırlıdır ve bu durum yüksek güç yoğunluğuna yönelik en uygun yapının belirlenmesini güçleştirmektedir.

Bu çalışma kapsamında; 270 V DC giriş ve 28 V DC çıkış gerilim seviyelerinde, 560 W çıkış gücünde çalışacak TAİY ve İAİY tabanlı dönüştürücü yapıları oluşturulmuş ve bu yapılar MATLAB/Simulink ortamında modellenerek incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, tek ve iki anahtarlı topolojiler karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

TAİY dönüştürücünün devre şeması Şekil 2.(a)'da, İAİY dönüştürücünün devre şeması Şekil 2.(b)'de verilmiştir. Kaynak gerilimi "V_S", resetleme sargısı diyotu "D_t", resetleme sargısı sarım sayısı "n_t", güç anahtarı "M", primer sarım sayısı "n_p", sekonder sarım sayısı "n_s", doğrultucu diyotu "D_{r1}", serbest dolaşım diyotu "D_{r2}", filtre endüktansı "L_f", filtre kondansatörü "C_f", yük "R_L", çıkış gerilimi "V_O", kenetleyici diyotlar "D_{c1}", "D_{c2}", zaman "t", doluluk oranı "D_r", periyot "T" ve resetleme süresi "t_m" ile gösterilmiştir.



Şekil 2. İleri yönlü dönüştürücü devre şemaları (a) tek anahtarlı (b) iki anahtarlı [6]

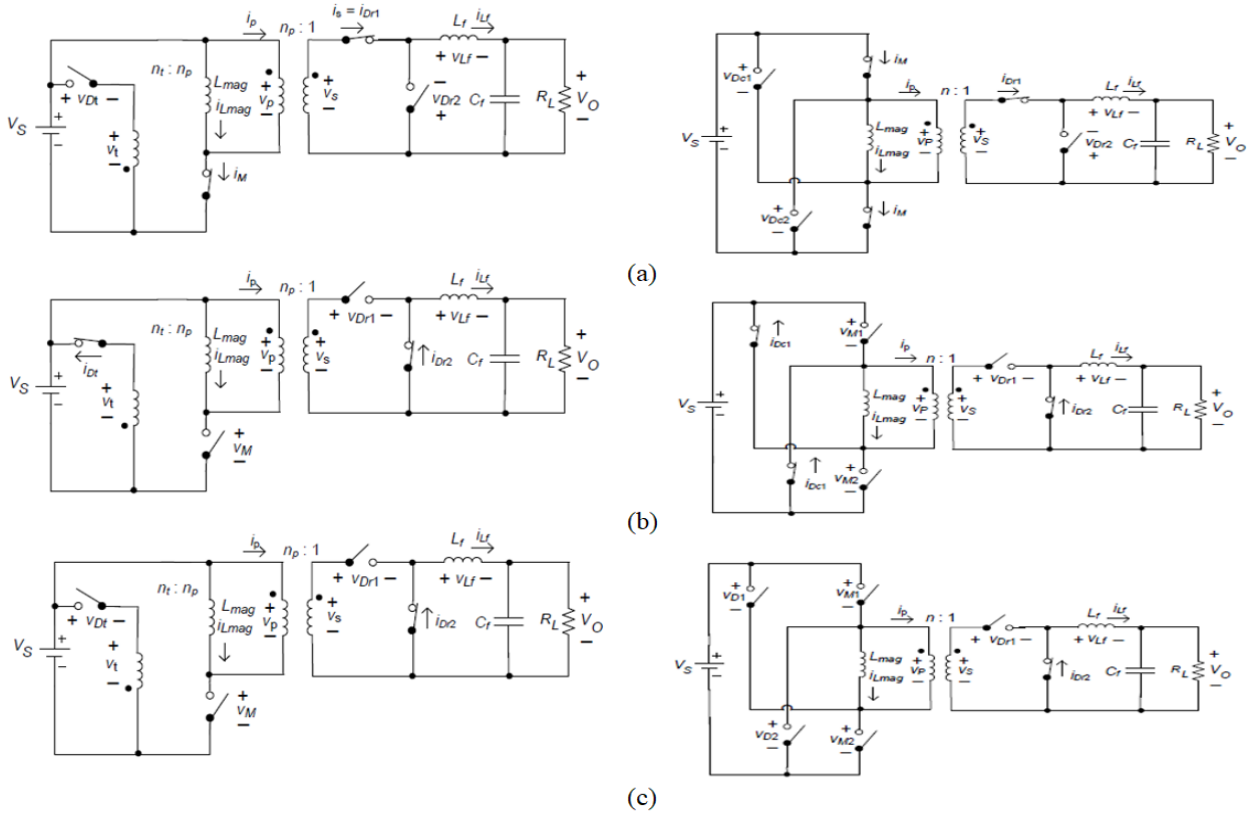
2.1. Sürekli İletim Modunda (SİM) Çalışmada TAİY ve İAİY Dönüştürücülerin Analizi

İleri yönlü dönüştürücüde çalışma prensibi, doluluk oranına bağlı olarak anahtarların belirli aralıklarla iletime ve kesime girmesi esasına dayanır. Doluluk oranı, transformatörün manyetik doyuma ulaşmaması için en fazla 0.5 olmalıdır. Bu sınırlamanın temel nedeni, anahtarların iletimde olduğu sürede transformatörün mıknatıslama endüktansında depolanan enerjinin, anahtarlar kesimdeyken resetlenerek çekirdek akısının sıfırlanması gerekliliğidir. Dolayısıyla, resetleme süresinin en az iletim süresi kadar olması koşulu ($D_r \leq 0.5$) sağlanmalıdır. SİM çalışma modunda; TAİY ve İAİY dönüştürücülerin çalışma prensibi, üç aralıkta incelenmektedir.

1. çalışma aralığında; TAİY'de M, İAİY'de M_1 ve M_2 eş zamanlı olarak iletime girer. Bu aralıkta iki topoloji için de ortak olarak; D_{r1} iletimde, D_{r2} kesimdedir ve primer sargıda endüklenen gerilim, sekonder sargıya aktarılırken transformatörün mıknatıslama endüktansında enerji birikimi gerçekleşir. Sekonder sargıdan elde edilen akım, D_{r1} üzerinden L_f ve C_f aracılığıyla yüke iletilir. TAİY'de M'nin, İAİY'de M_1 ve M_2'nin kesime girmesiyle birinci çalışma aralığı sona erer [5-7]. İki topoloji için de 1. çalışma aralığına ait eş değer devre şeması Şekil 3.(a)'da gösterilmiştir.

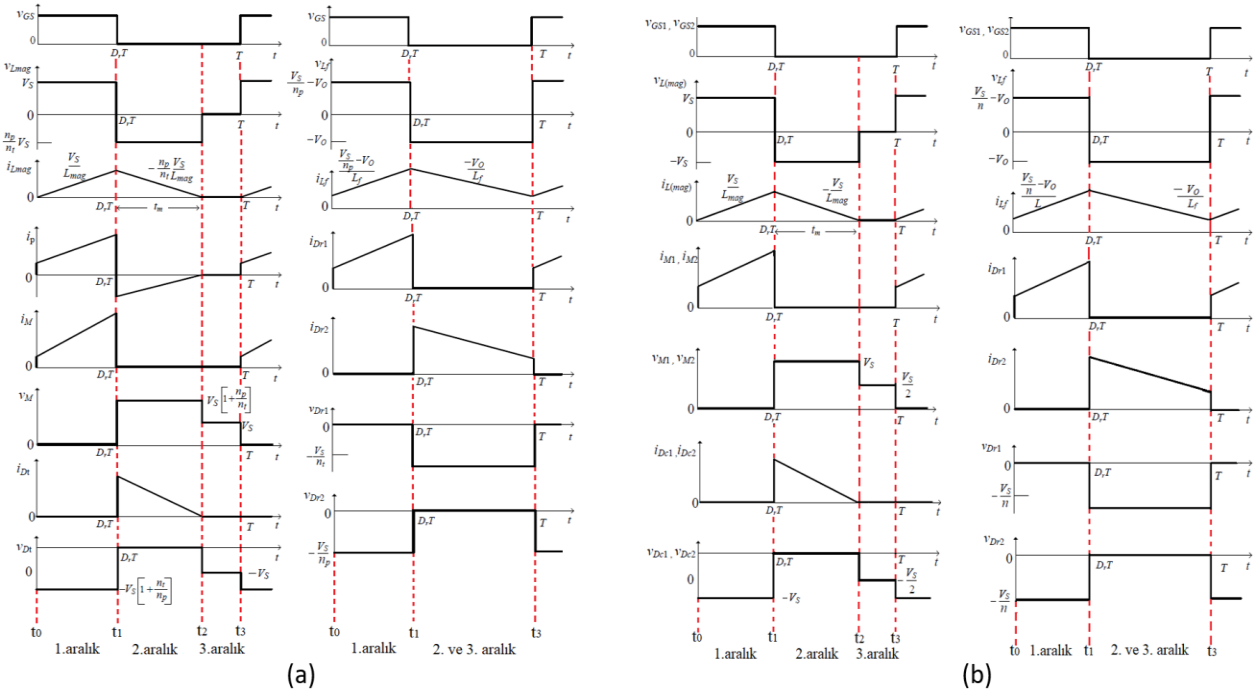
2. çalışma aralığında; transformatörün mıknatıslama endüktansında depolanan enerji, giriş kaynağına aktarılır ve enerji sıfırlanır. Sıfırlama işlemi, TAİY'de ilave bir resetleme sargısı aracılığıyla gerçekleşirken İAİY'de kenetleyici diyotlar aracılığıyla gerçekleşir. TAİY'de anahtarın kesime girmesiyle resetleme sargısı, İAİY'de ise anahtarların kesime girmesiyle kenetleyici diyotlar iletime girer. İki topoloji için de ortak olarak; sekonder tarafta D_{r1} kesimdeyken, L_f'nin akım sürekliliğinin sağlanması amacıyla D_{r2} iletime girer. Transformatörün mıknatıslama endüktansındaki enerji sıfırlandığında, yani resetleme süresi t_m tamamlandığında, ikinci çalışma aralığı sona erer [5-7]. İki topoloji için de 2. çalışma aralığına ait eş değer devre şeması Şekil 3.(b)'de gösterilmiştir.

3. ve son çalışma aralığında; iki topoloji için de ortak olarak, L_f'de depolanan enerji aracılığıyla D_{r2} üzerinden yük beslenir. TAİY'de primer tarafta yer alan D_t ile M ve sekonder tarafta yer alan D_{r1} kesimdedir. İAİY'de ise primer tarafta yer alan D_{c1}, D_{c2}, M_1, M_2 ve sekonder tarafta yer alan D_{r1} kesimdedir. Devrenin çalışma periyodu tamamlandığında, üçüncü çalışma aralığı sona erer [5-7]. İki topoloji için de 3. çalışma aralığına ait eş değer devre şeması Şekil 3.(c)'de gösterilmiştir.



Şekil 3. TAİY ve İAİY dönüştürücülerin çalışma aralıklarındaki eş değer devre şemaları (a) $(0 < t \leq D_r T)$ (b) $(D_r T < t \leq D_r T + t_m)$ (c) $(D_r T + t_m < t \leq T)$ [6]

TAİY ve İAİY dönüştürücülerin temel dalga şekilleri Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. İleri yönlü dönüştürücülerin temel dalga şekilleri (a) TAİY (b) İAİY [6]

2.2. Tasarım Parametrelerinin Hesaplanması

TAİY ve İAİY dönüştürücülerin tasarım parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

Denklem 1, tam yükteki çıkış direncini hesaplamak için kullanılır. Bu denklemde V_O çıkış gerilimi P_O çıkış gücüdür.

$$R_L = (V_O)^2 / P_O \tag{1}$$

Denklem 2, tam yükteki çıkış akımını hesaplamak için kullanılır.

$$I_O = V_O / R_L \tag{2}$$

Denklem 3, giriş geriliminin minimum (min), nominal (nom) ve maksimum (maks) değerlerine göre min, nom ve maks DC transfer fonksiyonlarını hesaplamak için kullanılır. Bu denklemde V_S giriş kaynak gerilimidir [5-7] [9-11].

$$M(D_r) = V_O / V_S \tag{3}$$

Denklem 4; dönüştürücünün verimi, maks doluluk oranı ve maks DC transfer fonksiyonu bilgileri kullanılarak, transformatörün dönüşüm oranını hesaplamak için kullanılır [5-7] [9-11].

$$n = \frac{\eta \; x \; D_{r_{maks}}}{M(D_r)_{maks}} \tag{4}$$

Denklem 5, yeni dönüşüm oranına göre; DC transfer fonksiyonunun min, nom ve maks değerleri kullanılarak; min, nom ve maks doluluk oranlarını hesaplamak için kullanılır [5-7][9-11].

$$D_r = \frac{n\ x\ M(D_r)}{\eta} \tag{5}$$

Denklem 6, SİM modunda çalışma olabilmesi için minimum filtre endüktansı, L_f, değerini hesaplamak amacıyla kullanılır. Bu denklemde, ΔI_{Lf} endüktans akımındaki dalgalanma miktarını, f_s anahtarlama frekansını göstermektedir [5-7] [9-11].

$$L_f = \frac{V_O\ (1 - D_{r\,min})}{\Delta I_{Lf}\ f_s} \tag{6}$$

Denklem 7; min, nom ve maks doluluk oranlarına göre; min, nom ve maks endüktans akımı dalgalanma miktarını hesaplamak için kullanılır [5-7] [9-11].

$$\Delta I_{Lf} = \frac{V_O(1 - D_r)}{L_f\ f_s} \tag{7}$$

Denklem 8, filtre kondansatörünün eşdeğer seri direncini hesaplamak için kullanılır. Bu denklemde ΔV_O çıkış gerilimindeki dalgalanma miktarıdır [5-7] [9-11].

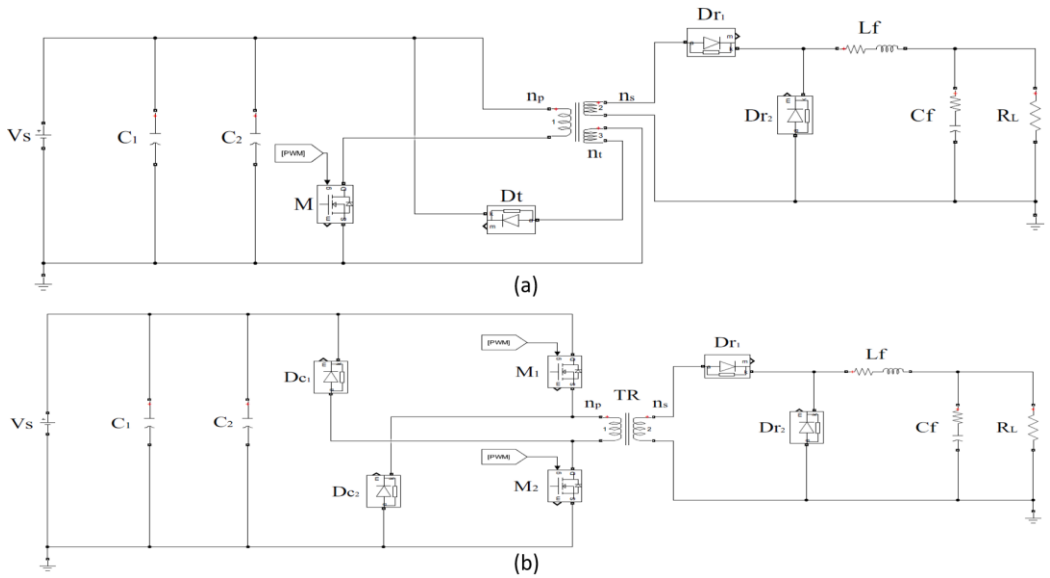
$$r_{Cf(maks)} = \frac{\Delta V_O}{\Delta I_{Lf,max}} \tag{8}$$

Denklem 9, filtre kondansatörünün, C_f, değerini hesaplamak için kullanılır. Bu denklemde $i_{Lf_{max}}$ filtre endüktansının üzerinden geçen akımın maksimum değeridir [5-7] [9-11].

$$C_{f(min)} = \frac{i_{Lf_{max}}}{8 f_s \Delta V_ç} \tag{9}$$

3. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Dönüştürücülerin MATLAB/Simulink programında kurulan devre şemaları Şekil 5'de gösterilmiştir.

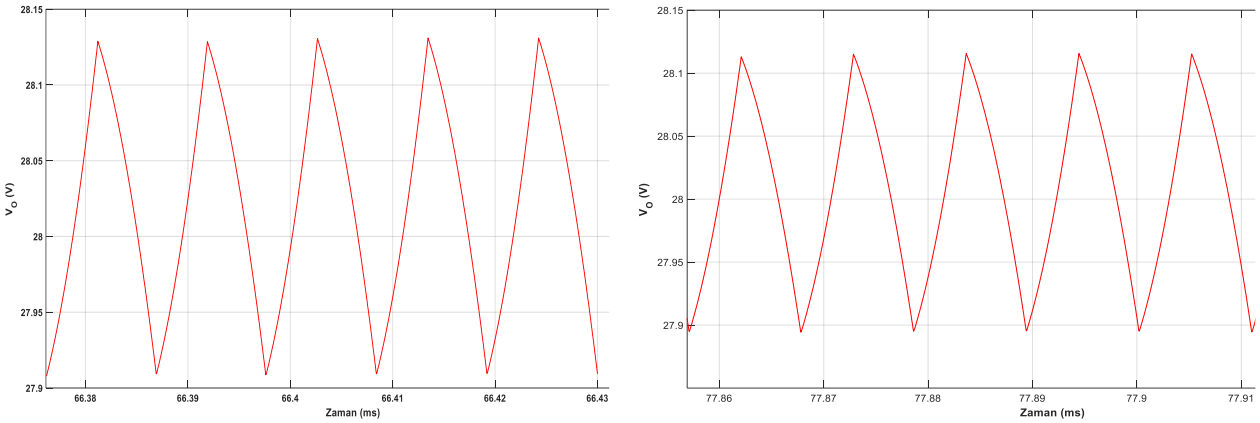


Şekil 5. TAİY ve İAİY dönüştürücülerin MATLAB/Simulink programında kurulan devre şemaları (a) TAİY (b) İAİY

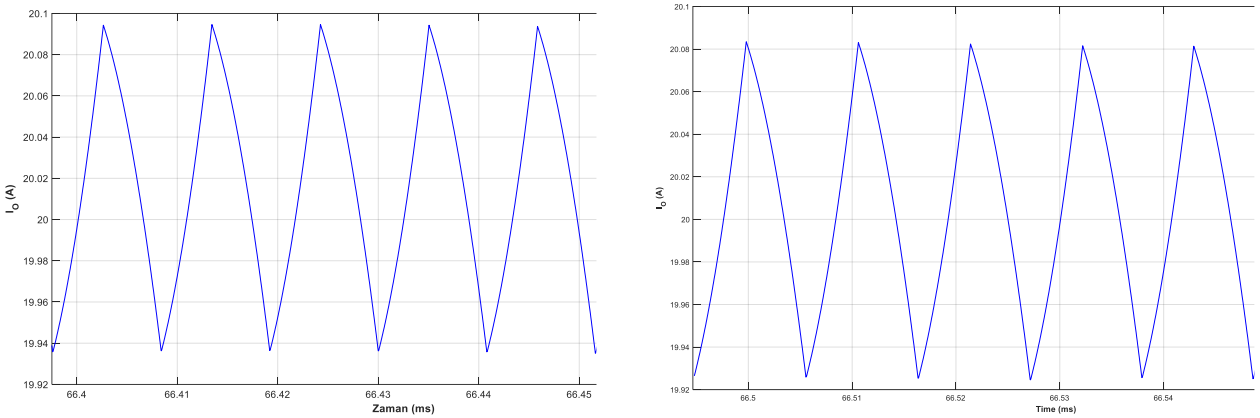
Tasarlanan TAİY ve İAİY dönüştürücülerin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 6 ve Şekil 7'de sırasıyla; çıkış gerilimi ve çıkış akımı dalga şekilleri için simülasyon sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 1. TAİY ve İAİY dönüştürücülerin özellikleri

Özellikler	**Değer - TAİY**	**Değer - İAİY**
Transformatör dönüştürme oranı	40:10:40 (n_p: n_s: n_t)	40:10 (n_p: n_s)
Çıkış gücü	560 W	
Giriş gerilimi	270 V DC	
Çıkış gerilimi	28 V DC	
Anahtarlama frekansı	100 kHz	
Giriş kondansatörleri (C_1, C_2)	10 μF, 4.7 nF	
Filtre kondansatörü (C_f)	120 μF	
Filtre endüktansı (L_f)	39 μH	



Şekil 6. Çıkış gerilim dalga şekli için simülasyon sonuçları (a) TAİY (b) İAİY



Şekil 7. Çıkış akım dalga şekli için simülasyon sonuçları (a) TAİY (b) İAİY

4. SONUÇ

Bu çalışmada; tek ve iki anahtarlı ileri yönlü dönüştürücüler, MIL-STD-704 standardı doğrultusunda 270 V DC - 28 V DC enerji dönüşümü için tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları, iki topolojinin de çıkış gerilimi ve çıkış akımı açısından benzer performans sergilediğini göstermiştir. Ancak anahtar üzerindeki gerilim davranışı açısından iki topoloji arasında belirgin bir ayrım bulunmaktadır. Tek anahtarlı topolojide anahtarın maruz kaldığı maksimum gerilim yaklaşık $2.6xV_{giriş}$ seviyesine kadar yükselirken, iki anahtarlı topolojide bu değer $V_{giriş}$ civarında sınırlanmaktadır. Bu durum, İAİY topolojisinde daha düşük gerilim sınıfına sahip anahtar kullanımına imkan tanıyarak iletim ve anahtarlama kayıplarını azaltmakta, böylece hem verim hem de güç yoğunluğu açısından avantaj sağlamaktadır. Sonuç olarak; askeri havacılık uygulamaları için aynı çalışma koşullarında, iki anahtarlı ileri yönlü topolojinin; yüksek güç yoğunluğu, anahtar gerilim stresinin düşük olması, iletim ve anahtarlama kayıplarının düşük olmasına bağlı olarak verimin yüksek olması gibi avantajları sebebiyle, tek anahtarlı ileri yönlü topolojiye kıyasla daha uygun bir seçenek olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] DEPARTMENT OF DEFENSE. (2016), *MIL-STD-704F w/Change 1: Aircraft Electric Power Characteristics*, Washington D.C.: Department of Defense.

[2] HAKYEMEZ, İ. ve KALENDERLİ, Ö. (2024), Analysis of 270VDC Electrical Power Distribution System Architectures in More Electric Aircraft Applications, *15th National*

Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Türkiye, syf. 1–5. DOI: 10.1109/ELECO64362.2024.10847111

[3] SETLAK, L., KOWALIK, R., GĘBURA, A. ve GOŁDA, P. (2024), Dynamic Stability Analysis of the Aircraft Electrical Power System in the More Electric Aircraft Concept, *Scientific Reports*, 14, 25521. DOI: 10.1038/s41598-024-74762-1

[4] EL, M. H. (2016), Askeri Havacılık Uygulamaları için Yüksek Güç Yoğunluklu DA/DA Yarım Köprü Tip Çevirici Tasarımı, Ankara: Hacettepe Üniversitesi.

[5] ZÜNGÖR, F. (2018), Yeni Bir Aktif Bastırma Hücreli İleri Yönlü Dönüştürücünün Tasarımı Ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[6] CHORAGUDI, V. S. A. K. (2011), Analysis and Design of Pulse-Width Modulated Two-Switch Forward DC-DC Converter for Universal Laptop Adapter, Yüksek Lisans Tezi, Wright State University, Department of Electrical Engineering.

[7] KAZIMIERCZUK, M. K. (2008), *Pulse-Width Modulated DC–DC Power Converters*, Dayton, Ohio, USA: Wiley.

[8] TAN, F. D. (2002), The Forward Converter: From the Classic to the Contemporary, *APEC – Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Dallas, Texas, USA, syf. 857–863. DOI: 10.1109/APEC.2002.989344

[9] BARRENETXEA IÑARRA, M., BARAIA ZUBIAURRE, I., LARRAZABAL BENGOETXEA, I. ve ZUBIMENDI AZACETA, I. (2018), *Power Electronic Converter Design Handbook*, Arrasate-Mondragon (Gipuzkoa): Mondragon Unibertsitateko Zerbitzu Editoriala.

[10] ZEHENDNER, M. ve ULMANN, M. (2016), Power Topologies Handbook, Texas Instruments.

[11] BODUR, H. (2017), Güç Elektroniği Temel Analiz ve Sayısal Uygulamalar, İstanbul: Birsen Yayınevi.

[12] SUKESH, A. ve GURURAJ, K. (2017), Two Switch Forward Converter For Charging Of Battery Through Hybrid Charging Technique, *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, 5(Special Issue 2). DOI: 10.17148/IJIREEICE/NCAEE.2017.09

[13] PARK, S. M., JANG, E. S., KOO, G. W., AHN, H. M. ve LEE, B. K. (2019), Design and Implementation of 30-W DC-DC Converter With High Reliability and Temperature Characteristics for Military Applications, *10th International Conference on Power Electronics – ECCE Asia*, Busan, Korea, syf. 2424–2429. DOI: 10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8797097

[14] MARTIS, J., VOREL, P. ve KNOBLOCH, J. (2017), Two-Switch Forward Converter Efficiency Optimization, *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) / IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (I&CPS Europe)*, Milan, Italy, syf. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977680

[15] SHIRSI, I., NAGASHREE, A. N., KUMAR KULKARNI, P., SINGH, B., CHIPPALKATTI, V. ve KANTHIMATHINATHINATHAN, T. (2012), Self-Resonant Reset Forward Converter With Dual-Outputs For Military Application, *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Bengaluru, India, syf. 1–6. DOI: 10.1109/PEDES.2012.6484425

[16] LIND, A. (2013), *Forward Converter Design Note (AN 2013-03)*, Infineon Technologies.

MODEL PREDICTIVE CURRENT CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Research Assistant EZGİ TAŞKIN
Kocaeli University, Faculty of Engineering, Electric Engineering, Electrical Engineering
ezgi.taskin@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7230-3401

Assoc. Prof. Dr. MEHMET ÖZDEMİR
Fırat University, Faculty of Engineering, Electrical and Electronics Engineering
mozdemir@firat.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1178-060X

Abstract

Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are a popular choice for industrial and electric-vehicle applications because of their high efficiency and precise controllability. Recently, the adoption of Model Predictive Control (MPC) techniques in PMSM control has increased significantly.MPC is an approach that optimizes control signals by predicting the system's future dynamic behavior, and it has attracted considerable attention for its potential to deliver high performance, fast dynamic response, and stable control in PMSM drives.

In PMSM-based systems, current control is one of the most critical components of high-performance drive design. Recently, Finite Control Set Model Predictive Control (FCS-MPC) has become a modern control method for PMSM current regulation. In this study, an FCS-MPC-based current control method for a PMSM is modeled and validated through MATLAB/Simulink simulations. Using a discrete-time dq-axis PMSM model, the stator currents are predicted for the whole candidate voltage vectors at each sampling instant, and the optimal switching state—i.e., the one with the minimum cost—is imposed directly.

The results show that FCS-MPC can offer advantages in terms of fast response and low ripple. At the same time, computational delay, cost-function selection, and switching-frequency management remain critical design parameters.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), Model Predictive Current Control (MPCC), Finite Control Set Model Predictive Control (FCS-MPC), MATLAB/Simulink Simulation

1. INTRODUCTION

The growing need for high efficiency, fast transient response, and low ripple in electric drive systems has recently strengthened the role of permanent magnet synchronous motors (PMSMs) across industrial applications. Due to advantages such as a wide speed range, low electrical losses, and high efficiency, PMSMs have become one of the most widely used motor types in battery electric vehicles (EVs). They are also frequently preferred in robotics and applications requiring precise motion control (Feng et al., 2024),(Türker et al., 2016). However, the need for accurate current and torque control in PMSMs has revealed the limitations of conventional control approaches, necessitating the use of more advanced control methods. Although traditional methods such as Field-Oriented Control (FOC) (Yao et al., 2021) and Direct Torque Control (DTC) (Li et al., 2022; Sun, Diao, 2021) are widely implemented in practice, they still involve certain constraints and performance limitations (Prajapati, 2024)

In this context, Model Predictive Control (MPC) techniques—particularly Finite Control Set Model Predictive Control (FCS-MPC)—have emerged as one of the prominent methods for current control in PMSMs. In the FCS-MPC approach, the discrete-time mathematical model of the system is used to evaluate all possible switching states of the power converter at each control period (eight states for a two-level inverter), and the optimal switching state is selected by minimizing a cost function that may include d–q axis current errors, torque error, and other performance criteria (Yang & Wu, 2021),(Bartsch et al., 2017).

Since the selected switching state can be applied directly to the inverter without the need for an additional modulation stage, the method offers both fast dynamic response and a simple implementation structure (Rodriguez et al., 2013). Moreover, the ability to directly incorporate nonlinear operating conditions and control constraints into the model makes FCS-MPC a flexible and effective control approach (Körpe et al., 2022). Hanshi Yang and Hong Wu emphasize that FCS-MPC provides significant advantages in handling constraints in nonlinear systems and improving dynamic performance; they also note that, compared with Continuous Control Set MPC (CCS-MPC), it offers benefits such as lower computational requirements and easier implementation in real-time applications (Yang & Wu, 2021).

One of the main reasons why FCS-MPC is preferred in PMSM drives is the sensitivity of conventional PI-based cascaded current controllers to parameter variations, as well as the difficulties in reducing torque/current ripple and achieving a fixed switching frequency. Comparative studies have shown that model predictive current control (MPCC) provides faster and better dynamic performance than hysteresis current control, and produces lower current and torque ripple under variable speed and load conditions (Sankararao et al., 2022). These findings support that MPCC offers advantages such as fast current response, effective current regulation, and a relatively simple implementation structure as a high-performance control strategy for PMSM drive systems (Feng et al., 2024),(Sun et al., 2021). Nevertheless, Arthur G. Bartsch and co-authors emphasize that the design of the cost function and the selection of weighting factors in FCS-MPC have a direct impact on performance indicators such as torque error, maximum torque-to-current ratio, and current total harmonic distortion (THD) (Bartsch et al., 2017). Therefore, the performance of FCS-MPC largely depends on defining a cost function and weighting strategy that are appropriate for the system requirements.

On the other hand, another important advantage of FCS-MPC is its ability to deliver a very fast dynamic response during transient operating conditions. Xu and co-workers investigated FCS-MPC-based direct speed control for interior permanent magnet synchronous motors (IPMSMs) and demonstrated that both speed-tracking performance and current control can be improved by using cost functions with multiple constraints and dynamically adjustable weighting factors (Xu et al., 2017). Consequently, in PMSM drives, finite control set model predictive current control offers significant benefits such as higher dynamic performance, the direct incorporation of nonlinear effects and constraints into the control structure, improved robustness against parameter variations, and reduced harmonic distortion as well as torque/current ripple. Nevertheless, ongoing improvements addressing issues such as computational burden in real-time implementations, cost function/weighting-factor selection, and stability under different operating conditions continue to support the advancement and wider adoption of FCS-MPC in both academic research and industrial applications.

This paper develops a MATLAB/Simulink model of a PMSM drive employing an MPC-based current controller and evaluates its behavior through simulation. The structure of the paper is as follows. Section 2 details the PMSM model, the dq reference-frame transformation, and the MPC current control design. Section 3 presents the simulation results and performance assessment. Section 4 provides the conclusions and summarizes the key findings.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Mathematical Model of the PMSM

The dynamic model of the PMSM defined in the rotating reference frame (d–q) is presented as follows;

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} i_q \omega_\Gamma + \frac{1}{L_d} u_d \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} i_d \omega_r - \frac{\psi_{pm}}{L_q} \omega_r + \frac{1}{L_q} u_q \quad (2)$$

In Equations (1) and (2), i_d , i_q denote the dq-axis components of the stator current vector ,while u_d and u_q represent the corresponding components of the stator voltage vector u_S in the same reference frame. L_d and L_q are the d- and q-axis stator inductances, ω_r is the rotor electrical angular speed, and ψ_{pm} is the permanent-magnet flux linkage.

The mechanical equation of motion of the PMSM is given below:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -\frac{1}{J_t} T_e + \frac{B_m}{J_t} \omega_m - \frac{1}{J_t} T_L \quad (3)$$

In Equation (3), J_m is the moment of inertia; ω_m is the motor's mechanical angular speed; T_e is the electromagnetic torque; T_L is the load torque; and B_m is the friction coefficient.

The electromagnetic torque equation of the PMSM is given below:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \left[\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_d\right] i_q \quad (4)$$

Here, n_p is the number of pole pairs of the motor. Assuming a surface-mounted PMSM, $L_d = L_q = L_s$ in this case, the electromagnetic torque expression can be simplified as in Equation (5).

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_{pm} i_q \quad (5)$$

2.2. Model Predictive Current Control (MPCC) for a PMSM

Current control in PMSMs is predominantly performed in the two-axis dq- reference frame. In an MPC-based current control approach, the motor's mathematical model is used to predict the current values at the next sampling instant, and then the optimal voltage vector is selected by minimizing the defined cost function (Demir & Gümüşçü, 2024).

Figure 1 illustrates the basic principle of the FCS-MPC strategy. The selection of the best voltage vector is achieved by predicting how the nonlinear stator current will evolve in the future.

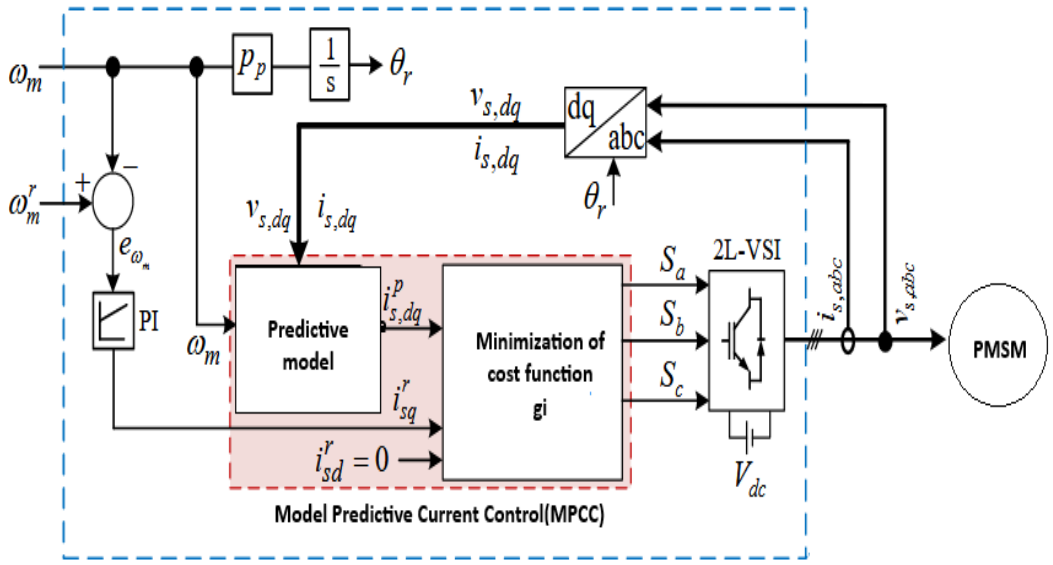


Figure 1. Control structure diagram of MPCC

For the PMSM drive system, the two-level voltage-source inverter (2L-VSI) and its voltage vectors are shown in Figure 2. The power-stage topology of the 2L-VSI for the proposed system is illustrated in the figure.. The 2L-VSI consists of two complementary power switches (typically IGBTs) for each phase leg, and therefore has a simpler topology compared to multilevel inverters.

Imposing the constraint that the upper and lower switching devices of a VSI do not conduct simultaneously yields eight feasible switching combinations. For each leg, the switching state is denoted as 1 when the upper switch is ON and the lower switch is OFF, and as 0 when the lower switch is ON and the upper switch is OFF (Taşkın et al., 2021). In a phase leg, the condition where the upper switch is conducting (ON) and the lower switch is blocked (OFF) is defined as “1” (state-1), whereas the condition where the upper switch

is blocked and the lower switch is conducting is expressed as “0” (state-0). Depending on these switching states, eight basic voltage vectors are obtained.

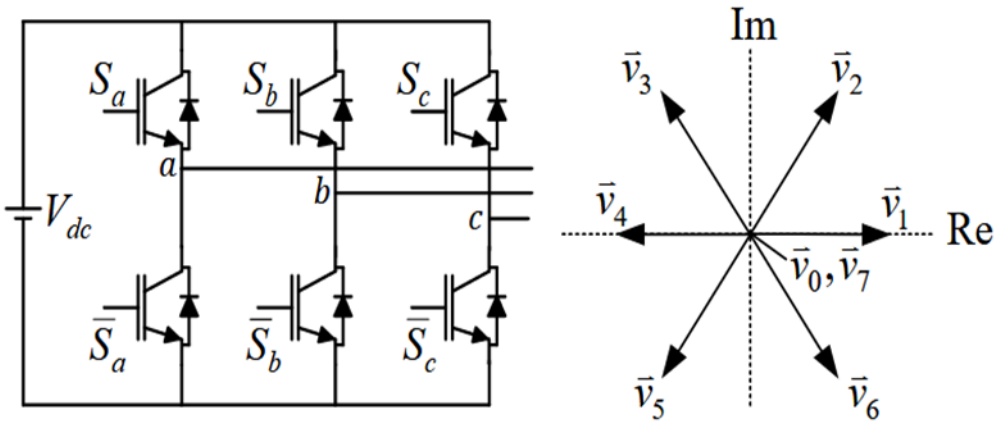


Figure 2. Two-level voltage-source inverter and voltage vectors(Demir & Gümüşcü, 2024)

The switching states of the 2L-VSI shown in Figure 2 are given in Equation (6)

$$u_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} V_{dc} \left(S_{1\alpha} + \alpha S_{1b} + \alpha^2 S_{1c}\right) \tag{6}$$

Here, Vdc denotes the DC-link voltage, and S1x∈{S1a,S1b,S1c} represents the switching state of the upper switch in each inverter leg. The α axis indicates the 120 electrical-degree phase displacement among the phases. To transform this voltage vector defined in the αβ frame into the dq- axes, the rotor electrical position θr must be known (Zerdali & Kılıç, 2025). This transformation can be expressed as follows:

$$u_{dq} = u_{\alpha\beta} e^{-j\theta r} \tag{7}$$

In direct MPC schemes, a discrete-time PMSM model is required to compute the inverter switching commands for the **next sampling period**. In this study, the PMSM model given in Eqs. (1)–(5) is discretized with the first-order forward Euler method, resulting in the discrete-time formulations presented in Eqs. (6)–(10).

$$i_{d,k+1} = \left(1 - \frac{R_s T}{L_d}\right) i_{d,k} + \frac{L_q T}{L_d} \omega_{r,k} i_{q,k} + \frac{T_s}{L_d} u_{q,k} \tag{8}$$

$$i_{q,k+1} = \left(1 - \frac{R_s T}{L_q}\right) i_{q,k} - \frac{L_d T}{L_q} \omega_{r,k} i_{d,k} - \frac{\psi_{pm} T}{L_q} \omega_{r,k} + \frac{T}{L_q} u_{q,k} \quad (9)$$

$$\omega_{m,k+1} = \left(1 - \frac{B_t T}{J_t}\right) \omega_{m,k} + \frac{T}{j_t} T_{e,k} - \frac{T}{J_t} T_{l,k} \quad (10)$$

$$T^{\,p}_{e,k+1} = \frac{3}{2} p_p (\psi^{\,p}_{d,k+1} i^{\,p}_{q,k+1} - \psi^{\,p}_{q,k+1} i^{\,p}_{d,k+1}) \quad (11)$$

$$T^{\,p}_{e,k+1} = \frac{3}{2} p_p \psi_{pm} i^{\,p}_{q,k+1} \quad (12)$$

The predicted stator currents obtained using the discrete mathematical model of the PMSM are given in Equation (13) and Equation (14).

$$i^{p}_{d,k+1} = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_s}\right) i_{d,k} + p_p T_s \omega_{r,k} i_{q,k} + \frac{T_s}{L_s} u_{q,k} \quad (13)$$

$$i^{p}_{q,k+1} = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_s}\right) i_{q,k} - p_p T_s \omega_{r,k} i_{d,k} - \frac{T_s p_p}{L_s} \omega_{r,k} \psi_{pm} + \frac{T_s}{L_s} u_{q,k} \quad (14)$$

The cost function is given in Equation (15). In MPCC, the active voltage vector is selected by minimizing this cost function. and $i^{*}_{d,k+1}$ and $i^{*}_{q,k+1}$ denote the reference values of the stator currents in the dq- frame, while *i* represents the applied voltage vector.

$$g(i) = (i^{*}_{d,k+1} - i^{p}_{d,k+1}(j))^2 + (i^{*}_{q,k+1} - i^{p}_{q,k+1}(i))^2 + I_{max}(i) \quad (15)$$

Imax is a limiting term that protects the PMSM against overcurrents. It is given in Equation (16).

$$I_{max} = \begin{cases} \infty, & eger\ |i_s^p| > i_{s,max} \\ 0, & diger \end{cases} \quad (16)$$

3. RESULT AND DISCUSSION

In this study, the proposed electric drive system was implemented in the MATLAB/Simulink environment, and a PMSM model with the specifications given in Table 1 was used. The parameters employed under the simulation conditions are presented in Table 2. A conventional PI controller was applied for speed control, and the controller gains were tuned on a trial-and-error basis and are listed in Table 2.

Table 1. Parameters of the PMSM

Parameter	Nominal Value
R_s [Ω]	2.875
L_s [mH]	0.00153
n_m [dev/dk]	1500
ψ_{pm}[V.s]	0.175
j_t [kg.m2]	0.001469
B_T[N.m.s]	0,0003035
p_p	4

Table 2. The parameters used in the simulation studies

Parameter	Value
$i_{s,max}$	30 A
K_p	40
K_i	3

To validate the performance of the designed MPPC-based PMSM drive, step load torques were applied within the range of 2–5 Nm (2 Nm, 3 Nm, and 5 Nm) while the speed was kept constant. In this way, the proposed drive was tested under load variations. The corresponding results are presented in Figures 3–6.

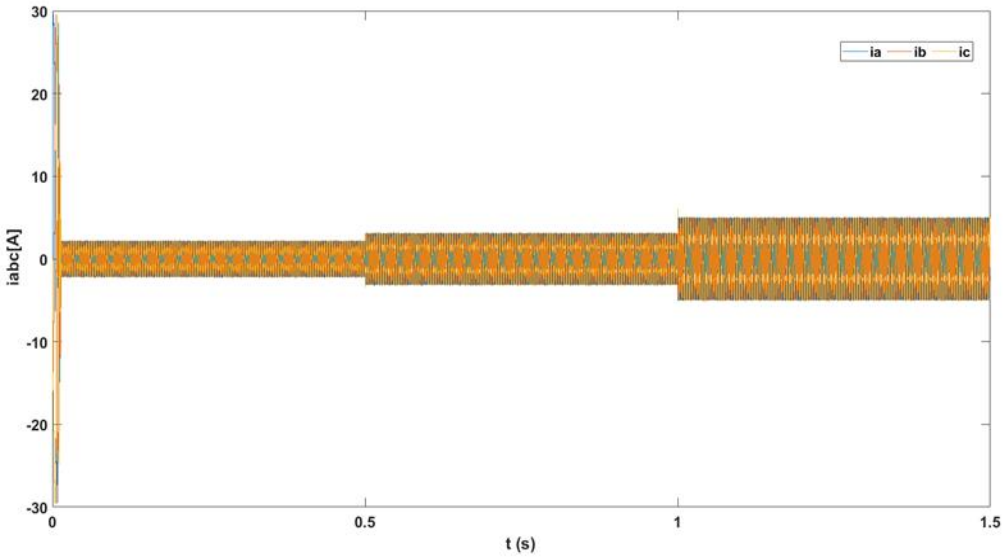


Figure 3. Stator current responses for different load torques

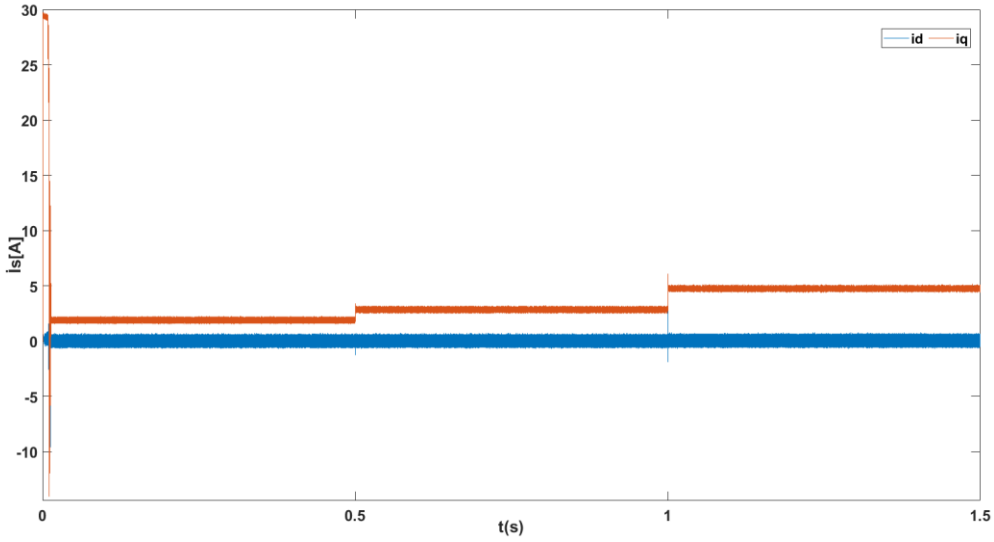


Figure 4. d- and q-axis current responses under varying load torques

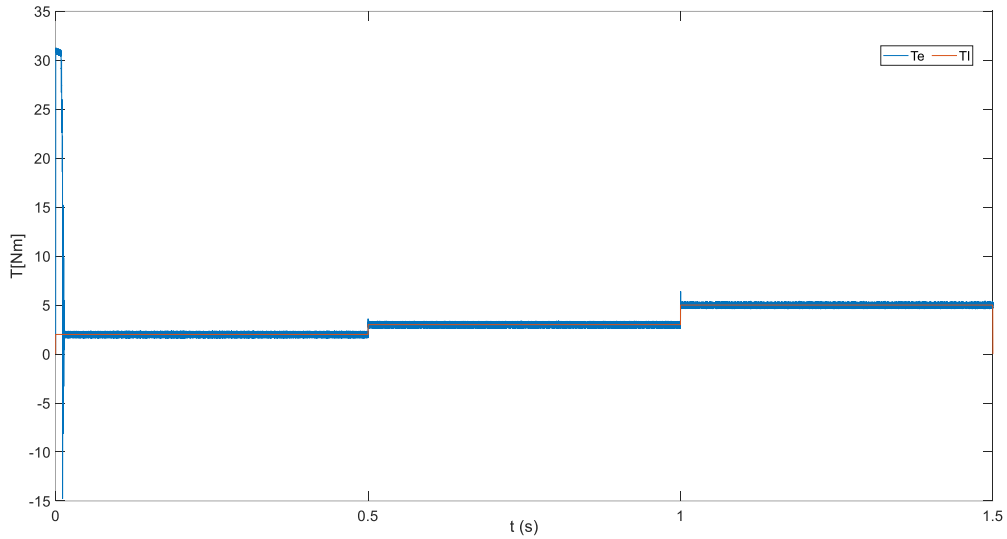


Figure 5. Electromagnetic torque and load torque responses under varying loads

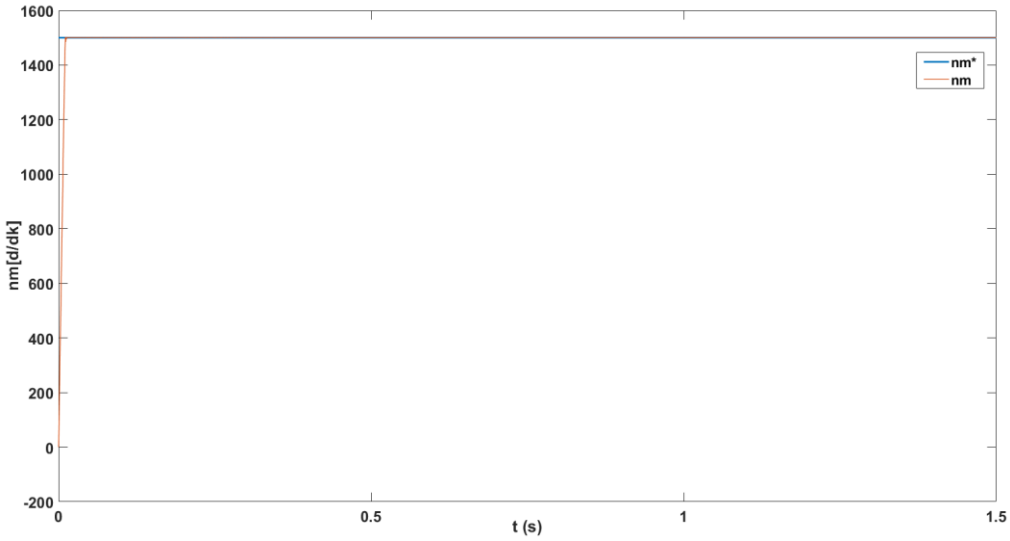


Figure 6. Reference speed and mechanical speed under varying loads

4. CONCLUSION

This paper, a finite control set model predictive current control (FCS-MPC) scheme was developed for a surface-mounted PMSM and validated in the MATLAB/Simulink environment. First, the mathematical model of the motor in the d–q reference frame was derived, and a discrete-time current prediction mechanism was established based on this model. Considering the finite set of inverter voltage vectors, the switching state was selected by minimizing a cost function at each sampling instant, thereby successfully implementing the FCS-MPC-based current control structure.

Simulation results indicate that the proposed FCS-MPC approach provides a fast dynamic response in PMSM current control, reduces current and torque ripple, and exhibits relatively high robustness against parameter variations. In addition, the ability to generate switching decisions directly without requiring an additional modulation stage constitutes a significant practical advantage. Nevertheless, several technical challenges may limit performance in real-time applications, including computational delays, maintaining a constant switching frequency, appropriate cost function design, and the accuracy of the discrete-time system model. Therefore, to ensure an effective and reliable implementation of FCS-MPC for PMSM current control, these advantages and limitations should be jointly considered, and the cost function, sampling/computation framework, and model parameters should be optimized according to the specific application requirements.

REFERENCES

Bartsch, A. G., Negri, G. H., Cavalca, M. S. M., de Oliveira, J., & Nied, A. (2017). Cost function tuning methodology for FCS-MPC applied to PMSM drives. *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, 1-6. https://doi.org/10.1109/COBEP.2017.8257320

Demir, R., & Gümüşçü, D. (2024). Sürekli mıknatıslı senkron motorların hız-algılayıcısız model öngörülü akım kontrolü. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *40*(1), Article 1. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1148954

Feng, Y., Zhang, C., Huang, S., Zhang, S., Qu, J., Li, Z., Zhai, L., & Zhao, Y. (2024). An Improved Model-Free Predictive Current Control for PMSM Drives Based on Current Circle Tracking Under Low-Speed Conditions. *IEEE Access*, *12*, 57767-57779. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3388252

Körpe, U. U., Gökdağ, M., Koç, M., & Gülbudak, O. (2022). Modulated Model Predictive Torque Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Machines. *El-Cezeri*, *9*(2), 777-787. https://doi.org/10.31202/ecjse.1008121

Li, T., Sun, X., Lei, G., Guo, Y., Yang, Z., & Zhu, J. (2022). Finite-Control-Set Model Predictive Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Systems—An Overview. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, *9*(12), 2087-2105. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105851

Prajapati, A. (2024). Advanced Control Strategies of PMSM for Battery Electric Vehicle Application: A Review. *Journal of Electrical Systems*, *20*, 1139-1149. https://doi.org/10.52783/jes.7390

Rodriguez, J., Kazmierkowski, M. P., Espinoza, J. R., Zanchetta, P., Abu-Rub, H., Young, H. A., & Rojas, C. A. (2013). State of the Art of Finite Control Set Model Predictive Control in Power Electronics. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *9*(2), 1003-1016. https://doi.org/10.1109/TII.2012.2221469

Sankararao, E., Gandhi, R., Chakraborti, A., & Roy, R. (2022). Comparative Analysis of Model Predictive and Hysteresis Current Control for PMSM drive Application. *2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 1-6. https://doi.org/10.1109/PEDES56012.2022.10080791

Sun, X., Diao, K., Lei, G., Guo, Y., & Zhu, J. (2021). Direct Torque Control Based on a Fast Modeling Method for a Segmented-Rotor Switched Reluctance Motor in HEV Application. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, *9*(1), 232-241. https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2950085

Sun, X., Wu, M., Lei, G., Guo, Y., & Zhu, J. (2021). An Improved Model Predictive Current Control for PMSM Drives Based on Current Track Circle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *68*(5), 3782-3793. https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2984433

Taşkın, E., Özdemir, M., & Sarıgül, İ. (2021). Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyon Tekniği ile Beş Fazlı Asenkron Motorun Matlab/Simulink Modeli. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, *12*(4), Article 4. https://doi.org/10.24012/dumf.1002124

Türker, T., Buyukkeles, U., & Bakan, A. F. (2016). A Robust Predictive Current Controller for PMSM Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *63*(6), 3906-3914. https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2521338

Xu, X., Sun, J., Yan, C., & Zhao, J. (2017). Model predictive direct speed control of interior permanent magnet synchronous motor. *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 392-397. https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978126

Yang, H., & Wu, H. (2021). Summary of Model Predictive Control Methods in Motor Drive System. *2021 IEEE 7th International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)*, 169-174. https://doi.org/10.1109/ICCSSE52761.2021.9545123

Yao, H., Yan, Y., Shi, T., Zhang, G., Wang, Z., & Xia, C. (2021). A Novel SVPWM Scheme for Field-Oriented Vector-Controlled PMSM Drive System Fed by Cascaded H-Bridge Inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *36*(8), 8988-9000. https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3054642

Zerdali, E., & Kılıç, C. (2025). Sabit mıknatıslı senkron motor kontrolü için doğrudan model öngörülü kontrol yöntemlerinin karşılaştırması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *40*(3), 1813-1822. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1568461

LOJİSTİKTE OTONOM UYGULAMALAR: DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN YENİ ROTASI

ÖZCAN BORA ÖZDEMİR
Universität Duisburg-Essen, Department of Logistics Engineering, M.Sc. Student
oezcan.oezdemir@stud.uni-due.de, ORCID: 0009-0003-9448-9870

Öğr.Gör. HÜSNÜ BAYSAL
Kocaeli Üniversitesi, Hereke Asım Kocabıyık MYO, Makine Programı
hbaysal@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0009-0006-4478-6529

Dr. Öğr. Üyesi NECMI CEMAL ÖZDEMİR
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
necmi.ozdemir@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2914-3577

Özet

Lojistik sektörü şu anda, otonom araç teknolojisindeki hızlı ilerlemelerle yönlendirilen hızlı bir dijital dönüşüm yaşamaktadır. Lojistiğin geleceği, teknolojik yeniliklerle ilgili yapılan çalışmalarla şekillendirilmektedir; robotlar depolarda daha aktif bir rol üstlenirken, dronlar paketleri teslim etmekte ve sürücüsüz kamyonlar malları şehirlerarasında taşımaktadır. Bu gelişmelerle, şirketler iş gücü maliyetlerini azaltmayı ve verimliliği artırmayı hedeflemektedir. Ancak bu dijital dönüşüm sadece maliyetleri düşürmek veya verimliliği artırmakla ilgili değil, hız, sürdürülebilirlik ve güven görmek isteyen müşteri dünyasında malların bir yerden başka bir yere nasıl taşındığını yeniden tasarlamakla da ilgilidir. Bu bağlamda, bu makale otonom araçların lojistiği nasıl dönüştürdüğünü, karşılaştıkları zorlukları ve otonom teknolojilerin geleceğinin ne olacağını incelemektedir.

Anahtar Kelimeler: Otonom Araçlar, Otonom Robotlar, Otonom Dronlar, Otonom Kamyonlar

AUTONOMOUS APPLICATIONS IN LOGISTICS: THE NEW ROUTE OF DIGITAL TRANSFORMATION

Abstract

The logistics industry is currently undergoing a rapid digital transformation driven by swift advancements in autonomous vehicle technology. The future of logistics is being shaped by studies related to technological innovations; robots are taking on a more active role in warehouses, drones are delivering packages, and driverless trucks are transporting goods between cities. With these developments, companies aim to reduce labor costs and increase efficiency. However, this digital transformation is not just about reducing costs or boosting efficiency—it is also about redesigning how goods are moved from one place to another in a world where customers expect speed, sustainability, and reliability. In this context, this article examines how autonomous vehicles are transforming logistics, the challenges they face, and what the future of autonomous technologies will be.

Keywords: Autonomous Vehicles, Autonomous Robots, Autonomous Drons, Autonomous Trucks

1. GİRİŞ

Çağımızın dinamik yaşamında trafik akışına hızla entegre olmaya devam eden otonom araç kavramı, günümüzde daha da görünür olmasına karşın yeni değildir. Onlarca yıldır bilim kurgu, makinelerin ulaşım gibi sıradan görevleri yerine getirdiği ve insanları daha yaratıcı çabalara odaklanma konusunda özgür bıraktığı bir dünyanın resmini çizdi. Bugün, bu vizyonun özellikle lojistik sektöründe uygulamaya

geçirildiği görülmektedir. Örnek olarak, sürücüsüz kamyonların halihazırda otoyollarda test edildiği ve Tesla, Waymo ve TuSimple gibi şirketlerin bu konuda başı çektiği görülmektedir (Mohan, 2025).

Diğer yandan da Braunschweig Teknik Üniversitesinin paylaştığı habere göre, ATLAS-L4 projesiyle 2025'te Almanya'da Level 4 otonom kamyonlarla test taşımacılığı yapılması ve lojistik merkezleri arası taşımacılığın mümkün kılınmış olması, bu alanda umut verici bir baska gelişmedir (Technische Universität Braunschweig, 2025).

Bu araçlar genel anlamda yollarda gezinmek, engellerden kaçınmak ve malları güvenli bir şekilde teslim etmek için sensörler, kameralar ve yapay zekanın bir kombinasyonunu kullanıyor. Benzer şekilde, teslimat dronları da geleneksel teslimat yöntemlerine göre daha hızlı ve daha çevre dostu bir alternatif sunarak gökyüzünde daha görünür biçimde yerini alıyor. Bu değişim, teslimatın son kilometresinin toplam nakliye maliyetlerinin %53'ünü oluşturabilmesi ve dron'lardan elde edilen verimlilik kazanımlarını özellikle çekici hale getirmesi nedeniyle gerçekleşiyor. McKinsey & Company tarafından yapılan bir çalışma, otonom kamyonların daha düşük işçilik maliyetleri ve geliştirilmiş yakıt verimliliği nedeniyle işletme maliyetlerini %45 azaltabileceğini tahmin ediyor. Ek olarak, Dünya Ekonomik Forumu tarafından hazırlanan bir rapor, dron teslimatının kentsel alanlarda son kilometre teslimat maliyetlerini %80'e kadar azaltabileceğini öne sürüyor (Mohan, 2025).

2. LOJİSTİKTE OTONOM UYGULAMALAR

Lojistik sektörü yıllar içinde Covid- 19 Pandemisi ve Rusya- Ukrayna Savası gibi krizlerin de gölgesinde biçim, çıktı, erişim ve uygulama gibi çeşitli yönlerden önemli ölçüde gelişti. Günümüzde sektör, son kilometre bağlantısını ve son kilometre görünürlüğünü vurgulamaktadır. Bu büyüme teknolojideki gelişmelerle iyi bir şekilde ilişkilidir. Müşterilerin daha hızlı ve daha verimli teslimat beklentilerini karşılayan, teknolojinin etkin olduğu, hızlı tempolu bir dünyaya geçiş, lojistik sektöründe teknolojik bir devrime yol açtı. Bu değişiklik, otomasyona ve farklı görevleri yerine getirmek için otonom robotların kullanılmasına bağlanabilir. Lojistik otomasyonu, tedarik zincirini optimize etmek, verimliliği artırmak ve insan hatasını azaltmak için robotik, yapay zeka (AI), makine öğrenimi (ML) ve Nesnelerin İnterneti (IoT) dahil olmak üzere ileri teknolojinin kullanımını içerir. Otomatik teknolojiler artık malların üreticilerden tüketicilere depolanması ve taşınmasına entegre ediliyor. Lojistikte otomasyon ve robotik uygulaması sadece maliyetleri veya zamanı azaltmak amacıyla değildir; aynı zamanda büyüyen küresel pazarda sürdürülebilirlik, güvenli çalışma ve güvenilirliğe yönelik yeni gereksinimlere yanıt vermekle de ilgilidir (Jha,2024).

2.1. Lojistik Sektöründe Robotların Rolü

Lojistikte robotlar, işgücü sıkıntısı, insan hataları ve 24/7 operasyon gerekliliği gibi sorunları ele alan sağlam bir temel oluşturmuştur. Robotlar artık sıralama, paketleme, nakliye ve son kilometre teslimatları gibi adımları optimize etmek için ayrılmaz araçlar haline geldi. Yalnızca verimliliği artırmaya yardımcı olmakla kalmıyor, aynı zamanda lojistik şirketlerinin operasyonlarını genişletmesine ve yüksek talebi karşılamasına da olanak tanıyor. Şirketlerin işgücü maliyetlerini düşürmelerine yardımcı olmak için lojistikteki robotlar, lojistik sektöründe operasyonel verimlilik için uçtan uca otomasyondan tedarik zinciri endişelerini hafifletmeye kadar depolarda daha büyük bir rol üstleniyor; Bu robotlara olan talep etkileniyor. Otomatik yönlendirmeli araçlardan (AGV'ler) işbirlikçi robotlara (cobot'lar) kadar, lojistikte robotik genişliyor ve işletmelere daha yüksek düzeyde operasyonel verimlilik elde etmeleri için araçlar sağlıyor. Lojistik sektöründe operasyonel verimlilik ve tedarik zinciri endişelerini hafifletmek için depolarda uçtan uca otomasyonun artan tercihi, bu robotlara olan talebi etkiliyor (Jha, 2024).

2.2. Lojistikte Otonom Araçların Rolü (Dron'lardan Sürücüsüz Kamyonlara)

Otonom araçların hızlı ilerleyişiyle birlikte lojistik sektörünün sismik bir değişim yaşadığı görülmektedir. Paket teslim eden dron'lardan şehirlerarası mal taşıyan sürücüsüz kamyonlara kadar lojistiğin geleceği gözlerimizin önünde yeniden şekilleniyor. Bu dönüşümün yalnızca maliyetleri düşürmek veya verimliliği

artırmakla ilgili değil; hız, sürdürülebilirlik ve hassasiyet gerektiren bir dünyada dünyada malların A noktasından B noktasına nasıl hareket ettiğini yeniden hayal etmekle ilgilidir (Mohan, 2025). Örneğin bu, Kocaeli'de üretim yapan bir firmanın makine parça üretimi ve montajı sonrası ürün paketlemesini müteakiben üretim tesisinden (A noktası) sürücüsüz kamyonun müşteri, lojistik merkezi gibi konumlara(B noktası) hareketinin nasıl gerçekleştirilebileceğinin senaryosunu hayata geçirmekle de ilgilidir.

Otonom Dronlar: Dron'lar, özellikle küçük boyutlarının ve havadan navigasyonun yaygın kara trafiği sorunlarını atladığı kentsel ve banliyö bölgelerinde, son kilometre teslimatları için uygundur. Tıbbi malzemeler ve tüketici ürünleri gibi hafif, zamana duyarlı paketleri, teslimat yerlerine doğrudan erişimle teslim edebilirler. Amazon ve Wing gibi şirketler, kısıtlı kentsel alanlarda lojistik süreçleri optimize etmek için dron teslimat sistemleri geliştiriyor (Frazer, 2024).

Otonom Araçlar: Sürücüsüz kamyonlar gibi otonom kara araçları, uzun mesafeli ve ağır yük lojistiğine hitap ediyor. Daha büyük yükleri uzun mesafelerde taşıyabilme yeteneği sayesinde otonom araçlar, dağıtım merkezleri ile diğer lojistik merkezleri arasında dökme malların taşınması için daha uygundur. Tesla ve TuSimple, daha uzun nakliye rotalarında operasyonel verimliliği artırmak için sürücüsüz kamyon teknolojisine yatırım yapıyor. Dron'lar ve otonom araçlar, lojistik zincirinin ayrı aşamalarını ele alarak birbirlerini tamamlıyor: Dron'lar son teslimat miline odaklanırken, otonom araçlar daha büyük ölçekli, uzun mesafeli taşımacılığı yönetiyor (Frazer, 2024).

2.3. Otonom Dron Teknolojisinin Temelleri

Otonom dron'lar, doğrudan insan kontrolü olmadan bağımsız olarak çalışabilmelerini sağlayan yapay zeka, bilgisayar görüşü ve gelişmiş sensörlerle donatılmış insansız hava araçlarıdır (İHA'lar). Geleneksel uzaktan kumandalı dron'ların aksine, bu akıllı sistemler karmaşık ortamlarda gezinebilir, engellerden kaçınabilir ve minimum insan gözetimi ile görevleri tamamlayabilir. (Gross, 2025).

Otonom dron tanımı, basit uzaktan kumanda özelliklerinin çok ötesine geçiyor. Bu gelişmiş uçaklar, bağımsız uçuş operasyonlarına olanak tanıyan gelişmiş karar verme algoritmalarını bir araya getirerek insansız araçların çalışma biçiminde temel bir değişimi temsil ediyor . Otonom bir dron, özünde çevresini algılayabilen, bilgiyi işleyebilen ve sürekli insan müdahalesi olmadan karar verebilen bir İHA'dır. Bu yetenek, onları radyo sinyalleri aracılığıyla sürekli pilot kontrolü gerektiren geleneksel dron'lardan ayırıyor. Dron'lardaki gerçek özerklik, onları standart insansız hava araçlarından ayıran birkaç temel özelliği içerir. Birincil ayırt edici faktör, yerleşik istihbarat sistemlerini kullanarak bağımsız olarak çalışabilme yeteneğidir . Otonom dronlar, GPS navigasyonu, bilgisayarlı görme, makine öğrenimi algoritmaları ve sensör füzyonu dahil olmak üzere birden fazla teknolojiyi entegre eder. Bu sistemler, dron'un ortamı ve görev parametreleri hakkında kapsamlı bir anlayış oluşturmak için birlikte çalışır. Otonomluk düzeyi, farklı modeller ve uygulamalar arasında önemli ölçüde farklılık gösterebilir. Bazı dron'lar önceden programlanmış uçuş yollarına ihtiyaç duyabilirken bazıları ise yapay zekayı kullanarak değişen koşullara gerçek zamanlı olarak uyum sağlayabiliyor. Dron endüstrisi, tamamen manuel kontrolden tam bağımsızlığa kadar altı farklı özerklik düzeyini tanır. Bu standartlaştırılmış çerçeve, kullanıcıların dron'larının tam olarak hangi yeteneklere sahip olduğunu anlamalarına yardımcı olur (Gross, 2025)

Tablo 1. (Gross, 2025)

Düzey	**Ad**	**Açıklama**	**İnsan Katılımı**
0	Otonom kullanım Yok	Tamamen manuel kontrol	Tam pilot kontrolü
1	Destekli	Temel stabilizasyon	Yardımlı pilot kontrolleri

2	Kısmi	Otomatik işlevler	Pilot izler ve müdahale eder
3	Koşullu	İdeal koşullarda kendi kendine uçma	Pilot kontrolü ele almaya hazır
4	Yüksek	Bağımsız çalışma	Minimum pilot izleme
5	Dolu	Tam özerklik	İnsan müdahalesi gerekmez

Seviye 1 ve 2, sistemin engel tespiti ve uçuş stabilizasyonu için yardım sağlamasıyla birlikte sürekli insan gözetimi gerektirir. 3'ten 5'e kadar olan seviyelerde, herhangi bir insan müdahalesi beklentisi olmadan tamamen otonom çalışabilen seviye 5 dronlarla, azalan miktarda izlemeye ihtiyaç vardır. Burada bilinmesi gereken en önemli taraf, Otonom ve otomatik çalışma arasındaki ayrımı anlamak, gelişmiş dron teknolojisiyle çalışan herkes için çok önemlidir. Bu terimler sıklıkla birbirinin yerine kullanılsa da temelde farklı operasyonel yaklaşımları temsil ederler. Otomatik dronlar önceden programlanmış talimatları takip eder ve yalnızca özel olarak başa çıkmak üzere programlandıkları durumlara yanıt verebilir. Beklenmedik durumlara uyum sağlama veya programlama parametrelerinin dışında kararlar verme yeteneklerinden yoksundurlar. Otonom dronlar ise durumları analiz etmelerini, deneyimlerden öğrenmelerini ve bağımsız kararlar almalarını sağlayan yapay zekaya sahiptir. Bu yetenek, öngörülemeyen olaylarla başa çıkmalarına ve davranışlarını gerçek zamanlı çevre koşullarına göre uyarlamalarına olanak tanır. Avrupa Havacılık Güvenliği Ajansı (EASA), otonom dron'ların yapay zekâ yardımıyla öngörülemeyen acil durumlarla başa çıkarak "pilotun müdahalesi olmadan güvenli bir uçuş gerçekleştirebileceğini" belirterek, düzenleyici çerçevesinde bu ayrımı açıkça ortaya koyuyor (Gross, 2025).

2.4. Otonom (sürücüsüz) kamyonların temelini oluşturan teknoloji

Otonom sürüş kontrol sistemleri genellikle üç ana bölüme ayrılır: çevresel algı, karar planlama ve kontrol bölümü. İlk olarak, çevresel algı, kamera, aktif radar, milimetre dalga radarı, entegre navigasyon vb. dahil olmak üzere çeşitli sensörler aracılığıyla otomobilin etrafındaki bilgileri toplar. Şu anda sektörde iki ana teknik yaklaşım var, biri Tesla tarafından temsil edilen kamera tabanlı çoklu sensör füzyon şeması. Diğeri ise Google ve Baidu tarafından temsil edilen, lidarın hakim olduğu ve diğer sensörlerin desteklediği teknik bir şemadır. Her iki senaryoda da sürücünün niyetine, hızına, dış ortamına vb. göre komutları ve rotaları hesaplamak için akıllı bir kontrol algoritmasına ihtiyaç vardır. Son olarak, tel kontrollü sistem sürüş komutlarını yerine getirir ve aracın çalışmasını kontrol eder (Ecotron, 2025).

Daha gelişmiş araç teknolojileri ortaya çıkmaya devam ettikçe, otonom kamyon seçeneklerine yönelik fırsatlar, belirli sürücü destek sistemlerinin sağlanmasından, insan müdahalesi olmadan tam özerkliğe kadar geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Bu yetenekler beş seviyeye ayrılabilir ve bunların hepsinin uygulanması halinde sektör için farklı etkileri vardır. Otonom araç teknolojisi Peloton, Tesla ve TuSimple gibi pazarı bozanların ürünü olarak kabul edilse de bu yenilik burada bitmiyor. Daimler, Peterbilt ve Volvo gibi daha eski veya geleneksel kamyon üreticileri de otomatik teknolojiden yararlanan bir gelecek için çalışıyor. Otonom Dronlarda olduğu gibi Otonom kamyon sürüşü seviyelerinde 5 seviye olarak şu şekilde tanımlanmıştır:

- **Seviye 1: Sürücü Yardımı—**otomatik olarak kontrol edilen bir işlev (yani hız sabitleyici)
- **Seviye 2: Kısmi Otomasyon—**hem direksiyon hem de hızlanma/yavaşlama otomatiktir ve sürücü aracın kontrolünü ele almaya hazırdır
- **Seviye 3: Koşullu Otomasyon—**güvenlik açısından kritik tüm işlevler otomatiktir, ancak sürücü belirli trafik ve çevre koşullarında mevcuttur

- **Seviye 4: Yüksek Otomasyon**—tam bir yolculuk için tüm güvenlik açısından kritik işlevleri ve yol koşullarını gerçekleştirmek üzere otomatikleştirilmiştir (sürücü hala mevcuttur)
- **Seviye 5: Tam Otomasyon**—tüm senaryolarda ve koşullarda bir insan sürücüye eşit performans göstermesi beklenir (sürücü mevcut değildir) (McCaw, 2020).

Otonom sürüşü desteklemek, OEM'lerin kamyonlara donanım ve yazılım eklemesini gerektirir: Donanım; kamyonun yakınındaki nesneleri ve şeritleri algılamak için kameralar, ışık tespiti ve menzil ölçüm (LiDAR) sistemleri ve radarlar gibi sensörleri; yüksek performanslı bilgisayarları; ve ana sistem arızalanırsa kamyonun güvenli bir şekilde manevra yapmasını sağlayan yedekli fren, direksiyon ve güç kaynağı sistemlerini içerir. Yazılım; çevresel algılama yazılımını (örneğin, nesne algılama, sınıflandırma ve tahmin); sensör füzyon algoritmalarını (birden fazla sensörden elde edilen verileri birleştirip doğruluğu artıran); karar verme yazılımını; yol planlama yazılımını; ve araç hareket kontrolünü içerir. Ana yazılım arızası durumunda minimum riskli manevrayı gerçekleştirmek için bazı ek yazılımlar da gereklidir. Yazılım işlevselliği, nesneleri tespit etmek, nesne hareketlerini tahmin etmek ve yol işaretlerini anlamak gibi işlevler için yapay zekâ ile geliştirilir; bazı şirketler ise teknoloji yığınının tüm unsurlarını kapsayan uçtan uca yapay zekâ yazılımı geliştirmektedir. Otonom kamyon taşımacılığının yaygınlaştırılmasında başlıca zorluklar, nadiren ortaya çıkan ancak dikkate alınması gereken durumların (kenar durumlar) tespiti ve yönetimi; yedeklilik (yedek sistem) gereksinimlerini karşılayan kamyonların ticari olarak temin edilebilirliği; ve LiDAR ile yedek fren ve direksiyon sistemleri gibi temel parçaların, ticari açıdan uygun fiyatlarla büyük miktarlarda bulunabilirliği gibi hususlardır. Mevcut kamyonların modifikasyonu, araç mimarisinde yapılması gereken değişiklikler (güvenliği sağlamak için) ve ek donanım gereksinimleri nedeniyle maliyet açısından uygulanabilir değildir. (Kelkar ve ark., 2024).

2.5. Lojistiğin Dijital Dönüşümü ve Otonom Lojistik Uygulamalarına Etkisi

Bu dönüşüme öncülük eden iki teknoloji, Nesnelerin İnterneti (lojistikte IoT) ve Yapay Zeka (lojistikte yapay zeka) birlikte, işletmelerin malları takip etme ve uyumu sağlama biçimini yeniden şekillendiriyorlar. Dolandırıcılığı önlemekten, kargo koşullarını izlemeye ve tedarik zincirindeki aksaklıkları tahmin etmeye kadar, IoT ve yapay zeka, modern lojistikte temel akıllı lojistik sistemleri haline geliyor. Günümüz depolarında, robotlar ve yapay zeka sistemleri insanlarla birlikte işleri daha hızlı ve doğru şekilde yapmak, işlemleri otomatikleştirmek, manuel müdahaleyi azaltmak ve genel verimliliği artırmak için çalışıyor, Robotlar siparişleri seçiyor, paketliyor ve ayırıyor, otonom drone'lar ve robotik kollar akıllı insan-makine iş birliği sağlıyor, akıllı kameralar ve sensörler envanteri gerçek zamanlı olarak takip ediyor, Otonom araçlar (AGV'ler - Otomatik Yönlendirmeli Araç) insan müdahalesi olmadan mal taşıyor. AVR'ler önceden belirlenmiş rotalarda veya dinamik olarak planlanan güzergâhlarda hareket eden otoınom araçlardır. Bu otomasyon seviyeside hataları azaltıyor ve işlemleri önemli ölçüde hızlandırıyor (Albertini, 2025)

Ayrıca lojistik uygulamalarında kullanılan bir başka otonom araçta AMR'dir (Otonom Mobil Robot).

AMR (Otonom Mobil Robot), gelişmiş sensörler (LiDAR, 3D kameralar, SLAM) ve son teknoloji yapay zeka teknolojisi kullanarak özgürce gezen tamamen otonom bir robottur. Gerçek zamanlı yol değişiklikleri ve engellerden kaçınma yeteneğine sahip olan bu cihaz, akıllı depolarda bölgeler arasında mal taşımak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Hiếu, 2025).

Lojistik sektörü, RFID ve Yapay Zeka'nın (AI) entegrasyonuylada yönlendirilen bir dönüşüm sürecinden geçiyor. Bu teknolojiler birlikte çalışarak otonom lojistik operasyonları oluşturuyor, İşletmeler daha hızlı teslimat, daha düşük maliyetler ve gerçek zamanlı takip için çabalarken, RFID ve yapay zeka modern lojistiğin vazgeçilmez bileşenleri haline geliyor. RFID ile yapay zeka arasındaki sinerji üç temel yolda çalışıyor, veri toplama, veri işleme ve analiz, otomasyon ve karar verme (Inthing, 2025).

2.6. Çevresel Faydalar

Lojistikte otonom araçlara yönelik en ikna edici argümanlardan biri, bunların endüstrinin çevresel etkisini azaltma potansiyelidir. Ulaşım, sera gazı emisyonlarına önemli bir katkıda bulunuyor ve kamyonlar tek başına küresel karbon emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturuyor (Mohan, 2025).

Sürücüsüz kamyonlar ve dron'lar, geleneksel ulaşım yöntemlerine göre daha sürdürülebilir bir alternatif sunuyor. Örneğin, otonom kamyonlar yakıt tüketimini en aza indirecek şekilde rotalarını optimize edebilirken, müfreze oluşturma sürtünmeyi azaltabilir ve yakıt verimliliğini artırabilir. Benzer şekilde, dronlar genellikle elektrikle çalışır ve bu da onları gazla çalışan teslimat araçlarına göre daha temiz bir alternatif haline getirir (Mohan, 2025).

Otonom araçlar, emisyonları azaltmanın yanı sıra atıkların azaltılmasına da yardımcı olabilir. Şirketler, teslimat rotalarını ve programlarını optimize ederek, malların taşınması için gereken yolculuk sayısını en aza indirebilir, yakıt tüketimini ve araçlardaki aşınma ve yıpranmayı azaltabilir. Bu da bakım maliyetlerinin düşmesine ve araçların ömrünün uzamasına yol açabilir (Mohan, 2025).

Çevresel faydaları ölçmek için belirli karbon emisyonu azaltma rakamları dahil edilebilir. Örneğin araştırmalar, müfreze oluşturmanın yakıt tüketimini %10'a kadar azaltabildiğini ve bunun da karbon emisyonunda önemli azalmalara yol açtığını göstermiştir. Ek olarak, şirketlerin otonom araçların kullanımı yoluyla karbon ayak izlerinde önemli azalmalar elde etmesi gibi başarılı çevresel iyileştirmelere ilişkin vaka çalışmaları da argümanı güçlendirecektir (Mohan, 2025).

2.7. Zorluklar ve Etik Konular

Otonom araçların lojistikteki faydaları açık olsa da, ele alınması gereken önemli zorluklar ve etik hususlar da var. En büyük zorluklardan biri düzenleyici onaydır. Dünyanın dört bir yanındaki hükümetler, özellikle güvenlik ve sorumluluk söz konusu olduğunda, otonom araçların nasıl düzenleneceği konusunda hâlâ boğuşuyor (Mohan, 2025).

Örneğin yoğun nüfuslu Ruhr Bölgesinde yer alan Dortmund'dan Dusseldorf Havaalanına sevkiyat yapmak ya da İstanbul, Berlin gibi metropollerde şehir içi ve çevresindeki otoyollardan geçmek durumunda olan bir otonom kamyonun yaptığı ve/veya karıştığı kaza durumunda sorumluluğun sürücüsüz kamyon, araç sahibi, üretici, operatör, şirket gibi taraflardan kime ait olduğu sektör paydaşları ve politika yapıcılar arasında dikkatli bir değerlendirme ve işbirliği gerektiren karmaşık sorulardır. Bu bağlamda farklı bölgelerde birleşik bir düzenleyici çerçeve oluşturmak özellikle zordur (Mohan, 2025).

Avrupa, gizlilik ve güvenlik endişeleri nedeniyle dron teslimatı konusunda daha katı düzenlemelere sahipken, Çin gibi ülkeler insan emeğine bağımlılığı azaltmak için otonom araç teknolojisine yoğun yatırım yapıyor (Mohan, 2025).

Bir diğer zorluk ise halkın kabulüdür. Pek çok kişi, özellikle güvenlik söz konusu olduğunda, otonom araçlara hâlâ şüpheyle yaklaşıyor. Sürücüsüz kamyonlar ve dron'lar gelişmiş güvenlik özellikleriyle donatılmış olsa da kazalar hâlâ meydana gelebiliyor ve kamuoyunun algısı bu teknolojinin benimsenmesinde önemli bir rol oynuyor (Mohan, 2025).

Güvenlik iyileştirmelerinin daha net bir resmini sağlamak için otonom ve insan güdümlü araçlar arasındaki karşılaştırmalı kaza oranları eklenebilir. Örneğin araştırmalar, otonom araçların, insan güdümlü araçlara kıyasla kat edilen kilometre başına daha düşük kaza oranına sahip olduğunu göstermiştir. Ek olarak, ramak kala olay analizinin dahil edilmesi, güvenliğe ilişkin daha kapsamlı bir görünüm sağlayacaktır (Mohan, 2025).

Son olarak, dikkate alınması gereken etik hususlar vardır. Örneğin, otonom araçlar nedeniyle işini kaybedebilecek milyonlarca kamyon şoförüne ne olacak? Bazıları bu teknolojinin araç bakımı ve yazılım geliştirme gibi alanlarda yeni işler yaratacağını savunurken, diğerleri yaygın işten çıkarmanın sosyal ve ekonomik etkisinden endişe ediyor (Mohan, 2025).

İşgücü etkisini ölçmek için belirli işten çıkarma tahminleri dahil edilebilir. Örneğin, araştırmalar ABD'de 2040 yılına kadar 3,5 milyona kadar kamyon şoförlüğü işinin otomatikleştirilebileceğini tahmin ediyor. Ayrıca, otonom araç bakımı ve yazılım geliştirmede yaratılan iş sayısı gibi sektörde yeni istihdam yaratılmasına ilişkin daha fazla veri dengeli bir görünüm sağlayacaktır. Yeniden eğitim programı örneklerini ve maliyetlerini araştırmak da değerli olacaktır (Mohan, 2025).

2.8. Gelecek Perspektifi

Günümüz dünyasında görülen zorluklara rağmen lojistikte otonom araçların geleceği parlak görünüyor. Teknoloji gelişmeye devam ettikçe sürücüsüz kamyonların, dron'ların ve diğer otonom araçların daha da yenilikçi uygulamalarını görmeyi bekleyebiliriz (Mohan, 2025).

Örneğin, robotların malları ayırma, paketleme ve taşıma gibi görevleri yerine getirmesiyle otonom depolar şimdiden gerçeğe dönüşüyor. Gelecekte, üretimden teslimata kadar tüm tedarik zincirlerinin otonom araçlarla desteklendiğini görebiliriz (Mohan, 2025).

Ayrıca, malları depolardan müşterilere sorunsuz bir şekilde taşımak için dronların ve sürücüsüz kamyonların birlikte çalıştığı otonom teslimat ağlarının yükselişini de görebiliriz. Bu, daha hızlı teslimat sürelerine, daha düşük maliyetlere ve daha sürdürülebilir bir lojistik sektörüne yol açabilir (Mohan, 2025).

Uluslararası Taşımacılık Forumu (ITF) tarafından yapılan bir araştırma, otonom kamyonlara yönelik küresel pazarın, maliyet tasarrufları ve artan verimlilik sayesinde 88 yılına kadar 2027 milyar dolara ulaşabileceğini tahmin ediyor. Ek olarak, belirli yatırım getirisi örnekleri sağlanabilir. Örneğin, otonom kamyonlara yatırım yapan bir lojistik şirketi, azalan işçilik maliyetleri ve artan yakıt verimliliği nedeniyle beş yıl içinde yatırımın geri dönüşünü görebilir (Mohan, 2025).

Sektördeki finansman ve yatırım eğilimleri de araştırılabilir. Örneğin, otonom araç girişimlerine yönelik risk sermayesi finansmanı, TuSimple ve Embark Trucks gibi şirketlerin teknolojilerini geliştirmek ve dağıtmak için yüz milyonlarca dolar toplamasıyla son yıllarda önemli ölçüde arttı (Mohan, 2025).

Sonuçta otonom araçların lojistikte benimsenmesi, teknolojik gelişmeler, düzenleyici onay, halkın kabulü ve altyapı gelişimi gibi çeşitli faktörlere bağlı olacaktır. Ancak bir şey açık: Lojistik sektörü büyük bir dönüşümün eşiğinde ve otonom araçlar bu devrimin ön saflarında yer alıyor (Mohan, 2025).

Bu teknolojilerin ne zaman ana akım haline geleceğine dair daha net bir resim vermek için daha spesifik benimseme zaman çizelgesi tahminleri sağlanabilir. Örneğin sektör uzmanları, sürücüsüz kamyonların 2030 yılına kadar geniş çapta benimsenebileceğini, dron teslimatının ise 2025 yılına kadar kentsel alanlarda yaygınlaşabileceğini öngörüyor. Kamyonlarda Seviye 5 özerkliği için beklenen zaman çizelgesi gibi teknolojiye hazır olma konusunda daha net kilometre taşları da değerli olacaktır (Mohan, 2025).

3. SONUÇ

Otonom araçların lojistik sektörüne entegrasyonu artık bir "eğer" değil, "ne zaman" meselesidir. Paket teslim eden dron'lardan ülke çapında mal taşıyan sürücüsüz kamyonlara kadar bu teknoloji, lojistik hakkındaki düşüncelerimizde devrim yaratmaya hazırlanıyor. Üstesinden gelinmesi gereken zorluklar olsa da, artan verimlilik, azalan maliyetler, daha küçük çevresel ayak izi ve iyileştirilmiş güvenlik gibi potansiyel faydalar göz ardı edilemeyecek kadar önemlidir. Otonom arac teknolojisinde ilerleme sağlandıkça, otonom araçların benimsenmesinin güvenli, etik ve sürdürülebilir bir şekilde yapılmasını sağlamak için sektör paydaşlarının, politika yapıcıların ve halkın birlikte çalışması çok önemlidir. Bu, işten çıkarmayla ilgili etik hususların ele alınmasını ve etkilenen işçiler için adil bir geçişin sağlanmasını içerir (Mohan, 2025).

4. TARTIŞMA

Lojistiğin geleceği hızlı bir şekilde kullanım yolu açılan ve uygulamada da kendine yer bulan, kabul gören otonom araçlardadır. Bu sensörler, kameralar ve yapay zekâ kombinasyonlu araçların sorunsuz bir şekilde

kullanımda olduğu ve insanın yol haritasını çizdiği bir gelecek ve sürdürülebilirlik temasıyla devam eden lojistikte otonom uygulamaları ile lojistiği öğrendiklerimizin, bildiklerimizin ötesine taşıyor.

KAYNAKLAR

Albertini, A. (2025, April 29), The role of IoT and AI in logistics traceability. The Traceability Hub 1 Aralık 2025 tarihinde https://thetraceabilityhub.com/the-role-of-iot-and-ai-in-logistics-traceability/ adresinden alındı.

Ecotron, (2022), *Autonomous driving 101: The fundamentals and key Technologies*, 3 Kasım 2025 tarihinde https://ecotron.ai/blog/autonomous-driving-101-the-fundamentals-and-key-technologies/ adresinden alınmıştır.

Frazer, J. (2024), *Autonomous drons vs. autonomous vehicles: Analyzing logistics applications of Amazon, UPS, Tesla and more*, 28 Ekim 2025 tarihinde https://logisticsviewpoints.com/2024/11/13/autonomous-drons-vs-vehicles-analyzing-logistics-applications-of-amazon-ups-tesla-and-more/ adresinden alındı.

Gross, R. J. (2025), *What are autonomous drons? Complete guide to self-flying technology*, 28 Ekim 2025 tarihinde https://www.propelrc.com/what-are-autonomous-drons/ adresinden alındı.

Hiếu, B. (2025), November 18). What is a smart warehouse? How smart warehouse transforming logistics 2025 1 Aralık 2025 tarihinde https://www.blueskyrobotics.ai/post/what-is-an-amr-robot-and-how-is-it-used-in-logistics adresinden alındı.

Inthing (2025), RFID and AI: The future of autonomous logistics operations 1 Aralık 2025 tarihinde https://inthing.io/rfid-and-ai-the-future-of-autonomous-logistics-operations adresinden alındı.

Jha, M. (2024), *5 key trends in logistics automation and autonomous robots*. RTInsights, 30 Ekim 2025 tarihinde https://www.rtinsights.com/5-key-trends-in-logistics-automation-and-autonomous-robots/ adresinden alındı.

Kelkar, A., Heineke, K., Kellner, M., & Möller, T., with Brennecke, R., & Chauhan, S. (2024), *Will autonomy usher in the future of truck freight transportation?*, 3 Kasım 2025 tarihinde https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/will-autonomy-usher-in-the-future-of-truck-freight-transportation adresinden alındı.

McCaw, J. (2020), *The five levels of autonomous trucking*., 3 Kasım 2025 tarihinde https://www.breakthroughfuel.com/blog/levels-of-autonomous-trucking/ adresinden alındı.

Mohan, A. (2025), *Autonomous vehicles in logistics: From drons to self-driving trucks*, 25 Ekim 2025 tarihinde https://blog.deyvos.com/posts/autonomous-vehicles-in-logistics-from-drons-to-self-driving-trucks/ adresinden alındı.

Technische Universität Braunschweig (2025), *Driverless trucks on the road are becoming a reality* 1 Aralık 2025 tarihinde https://magazin.tu-braunschweig.de/en/pi-post/driverless-trucks-on-the-road-are-becoming-a-reality/ adresinden alındı.

KAPALI OTOPARKLARDA LİTYUM-İYON BATARYALI ELEKTRİKLİ ARAÇLARLA İLİŞKİLİ YANGIN GÜVENLİĞİ SORUNLARI

ÖZCAN BORA ÖZDEMİR
Universität Duisburg-Essen, Department of Logistics Engineering, M.Sc. Student
oezcan.oezdemir@stud.uni-due.de, ORCID: 0009-0003-9448-9870

Öğr. Gör. HÜSNÜ BAYSAL
Kocaeli Üniversitesi, Hereke Asım Kocabıyık MYO, Makine Programı
hbaysal@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0009-0006-4478-6529

Dr. Öğr. Üyesi NECMI CEMAL ÖZDEMİR
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
necmi.ozdemir@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2914-3577

Özet

Dünya genelinde lityum-iyon bataryalı Elektrikli Araçlara olan talebin artmaya devam etttiği gözlenmektedir. Elektrikli Araçların (EV) dünya çapında faaliyete geçmesiyle birlikte, kapalı otoparklarda yangın olaylarına karışma olasılıklarının Araçların (artacağı öngörülmektedir. Bunların sonucunda, lityum-iyon batarya zarar görebilir dolayısıyla yangına maruz kalan elektrikli sonucunda, , kapalı otoparklardaki diğer araçların, yangına müdahale edenlerin ve yangın sonrası operasyonlara katılanların can güvenliğini korumayla ilgili tehditler oluşabilir. Bu bağlamda Elektrikli Araçların (EV) ve yolcularının güvenliği için Lityum-iyon bataryaların güvenli bir şekilde kullanılması, bağlamda Elektrikli bir voltaj ve sıcaklık aralığında tutulması gerekmektedir. Bunlar göz önüne alınarak bu makalede kapalı otoparklarda lityum iyon bataryalı elektrikli araçlarla ilişkili yangın riskleri ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lityum-İyon Piller, Elektrikli Araçlar, Yangın Riskleri, Yangın Güvenliği, Kapalı Alan, Otopark, Araç Yangını

FIRE SAFETY ISSUES RELATED TO LITHIUM-ION BATTERY ELECTRIC VEHICLES IN INDOOR PARKING LOTS

Abstract

It has been observed that the demand for electric vehicles with lithium-ion batteries continues to increase worldwide. With the global deployment of Electric Vehicles (EVs), it is also anticipated that the likelihood of involvement in fire incidents in enclosed parking lots will probably increase. As a result, lithium-ion batteries may be damaged, which can pose safety threats to the passengers in the electric vehicle exposed to fire, other vehicles in enclosed parking lots, responders to the fire, and those involved in post-fire operations. In this context, for the safety of Electric Vehicles (EVs) and their passengers, lithium-ion batteries need to be used safely, and their cells must be maintained within a specified voltage and temperature range. Taking these into consideration, this article addresses the fire risks associated with lithium-ion battery electric vehicles in enclosed parking lots.

Keywords: Lithium-Ion Batteries, Electric Vehicles, Fire Risks, Fire Safety, Indoor Area, Parking Garage, Vehicle Fire

1. GİRİŞ

Yüksek voltajlı Lityum-iyon Bataryalı Elektrikli Araçlar'da kullanılan bataryalar benzinli araçlardan farklı olarak yanıcı elektrolitler içermektedirler. Bu da elektrikli araç yangınında söndürmeyi zorlaştıran bir etkendir. Bir elektrikli araç yangınında ortaya çıkan önemli bir olayda bataryanın yüksek voltajının termal kaçışa yol açmasıdır. Bu durum batarya paketinin aşırı ısınmasına yol açarak diğer batarya hücrelerini de tutuşturarak önemli derecede zarar verici ve uzun süreli bir yangına sebebiyet verir. Termal kaçış yüksek miktarda ısı, toksik gaz ve kimyasal buhar salarak itfaiyeciler için ciddi yaşamsal risk oluşturur. İtfaiyecilerin güvenli bir şekilde, yaşamsal tehditleri bertaraf edebilmeleri için özel ekipmanlara sahip olmaları gerekmekle beraber elektrikli araç yangınlarını söndürme amaçlı geliştirilmiş teknikleri öğrenmeleri ve bu ekipmanları kullanacak şekilde eğitilmeleri de bir başka önemli konudur. Yangın esnasında elektrikli araçların elektrik sistemlerinin karmaşıklığı ve su kaynaklarına yakın olmaları da bir elektrik çarpması tehlikesini ortaya çıkarabilir ki bu yangınla mücadele sürecini karmaşık hale getiren bir durumdur. Burada gözardı edilmemesi gereken önemli bir konuda bu tür bir araç yangınını suyla söndürmenin normal içten yanmalı motorlu araçlardan alışık olunan sonucu vermeyeceğidir. Bu da ortalama bir değerle 40.000 litre su kullanmadan elektrikli araç yangınlarının söndürülebileceği anlamını taşımaz (Smol, 2023).

2. LİTYUM-İYON BATARYALARLA İLİŞKİLİ YANGIN RİSKLERİ

2.1. Kapalı otoparklarda Lityum-iyon Bataryalı Elektrikli Araçların Yangın Güvenliği İle İlgili Temel Zorluklar

Hızla gelişen Bataryalı Elektrikli Araç (BEV) dünyasında, kapalı otoparklarda yangın güvenliğinin tesisi önemli bir endişe haline gelmiştir. Yangınlar her bağlamda risk teşkil etse de, BEV'lerin benzersiz özellikleri potansiyel tehlikelerin öncelikli anlaşılmasını gerektirir. Bu bölüm, BEV'ler için kapalı otoparklarda yangın güvenliği ile ilgili temel zorlukları vurgulamaktadır ve bu konuları ele alarak, kılavuzlar, mevzuat veya güvenlik uygulamalarında değişiklikleri değerlendirirken kamu otoriteleri ve özel paydaşlara değerli bilgiler sunmayı amaçlamaktadır. Tartışma, BEV'lerin artan benimsenmesi ışığında kapsamlı bir yangın güvenliği yaklaşımının önemini vurgulamakta ve hem kullanıcılar hem de acil müdahale ekipleri için daha güvenli bir ortamın sağlanmasına katkıda bulunmaktadır (European Commission, 2025).

2.1.1 Lityum-iyon Bataryalı Elektrikli Araçlarla Olası Tehlikeli Olay Türleri

Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEV) için mevcut yangın güvenliği gereksinimleri, tehlikeli olayların meydana gelme olasılığını önemli ölçüde azaltmak için yetersizdir (Troitzsch, 2022). Ayrıca, BEV'lerdeki lityum-iyon pillerin termal kaçak, yangınlar, jet yangınları ve buhar bulutu patlaması (VCE) dahil olmak üzere çeşitli riskler barındırdığı ve yeniden tutuşma veya gecikmeli tutuşma olasılığına sahip olduğu görülmektedir. Bu bölümdeki sonraki kısımlar, bu risklerin her birini tanımlayıp açıklayacaktır. Bununla birlikte, pil paketleriyle ilişkili bu riskler bulunsa da, Hollanda Kamu Güvenliği Enstitüsü (NIPV) verileri, elektrikli araç yangınlarının neredeyse yarısının pil paketlerini içermediğini göstermektedir. Lityum-iyon pillerle ilişkili temel risklerden biri termal kaçaktır bu da bir lityum-iyon hücresinin ekzotermik bir reaksiyon yoluyla kontrolsüz, kendi kendine ısınan bir duruma girmesiyle meydana gelir. Bu olgu, pil hücrelerinde başlar, hücrelerin parçalanmasına yol açar ve potansiyel olarak pil paketi içinde termal yayılmaya neden olur (NIPV Annual Report, 2022 & 2023).

Bir batarya paketi, her biri anot (-) ile katodu (+) ayıran ve kritik bir bileşen olan ayırıcı ile birbirinden ayrılmış çok sayıda hücreden oluşur. Termal kaçış, genellikle fiziksel, termal veya elektriksel kötü kullanım nedeniyle bir hücrenin ayırıcısındaki bir kusur tarafından tetiklenebilir. Başladığında, termal kaçış, yükselen sıcaklıklar veya aşırı gerilimlerin batarya hücresi içinde kimyasal reaksiyonları başlattığı hızlı bir aşırı ısınma olayıdır. Bataryanın soğutma sistemi yetersiz kalırsa, ateşlenme meydana gelebilir. Bu ateşlenme, sırasıyla bitişik hücreleri ısıtarak termal yayılmaya yol açabilir. Bir batarya paketinde termal kaçak nedeniyle etkilenmiş hücre sayısı arttıkça, yangının ardışık hücrelere yayılma olasılığı da artar. Bu zincirleme reaksiyon nihayetinde tüm batarya paketinin arızalanmasına yol açabilir (European Commission, 2025).

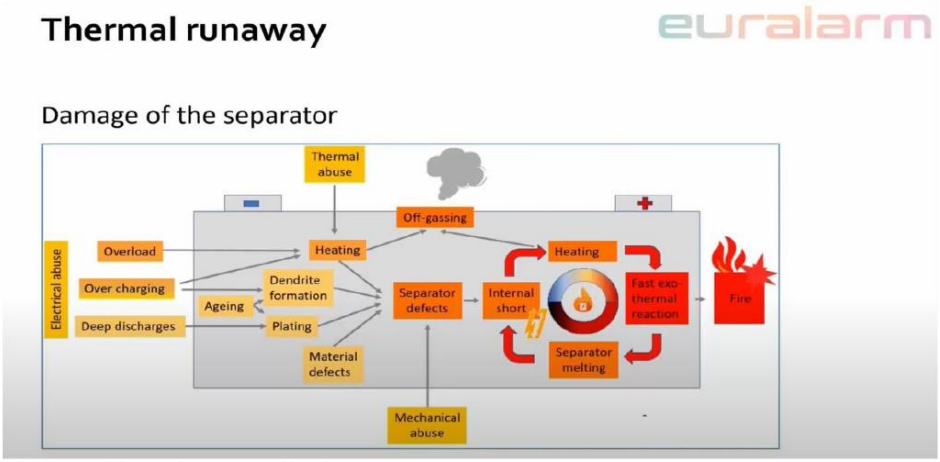


Diagram of thermal runaway, Euralarm

Şekil 1. Termal kaçış diyagramı, Euralarm ((European Commission, 2025)

Termal kaçak bazen nispeten düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 90–120°C) başlayabilir, genellikle aşırı şarj sonucu ortaya çıkar. Arızalanan batarya yanıcı gazlar saldıkça sıcaklık hızla yükselir ve bu gazlar, bir ateşleme kaynağı mevcutsa veya çevre ortam yanma için gerekli koşulları sağlıyorsa (yani yeterli oksijen, bir yakıt kaynağı ve ısı gibi) tutuşabilir. Termal kaçak yaşayan tam şarjlı bir batarya, batarya hücresinden boşaldığında tutuşabilecek önemli miktarda ısı ve gaz üretir. Kısa devreler, tutuşmayı daha da artırabilir. Ancak, batarya boşalmışsa veya düşük şarj seviyesine sahipse, hücrede salınan gazı tutuşma noktasına kadar ısıtacak yeterli enerji olmayabilir ve gaz tutuşmadan dışarı atılabilir (Norwegian Directorate for Civil Protection, 2021).

Mekanik hasar veya dış kaynaklı aşırı ısınma dışında, termal kaçış genellikle Batarya Yönetim Sistemi (BMS) batarya sorunlarını, örneğin aşırı ısınmayı, önleyici tedbirlerle ele alamadığında meydana gelir. Bu, serbest kalan gazların yangın ve patlaması dahil olmak üzere çeşitli reaksiyonlara yol açabilir ve kapalı alanlarda potansiyel olarak ciddi sonuçlar doğurabilir. Birkaç senaryo mümkündür (European Commission, 2025) :

- Serbest yanma: Yanıcı gazlar, pil paketinin içindeki sıcak metal parçaları gibi bir tutuş kaynağına maruz kaldığında tutuşur.

- Jet yangını: Gazlar momentumla dışarı akarak ve yönlü alevler üretir, genellikle araç yan tarafından kaçacak şekilde tasarlanır, böylece aşırı basınç azalır.

- Parlama yangını: Tahliye edilen gazlar, yanıcılık aralığı içindeki hava ile karışır ve deflagrasyon (ses hızının altında meydana gelen hızlı yanma olayı) oluşur, bu da tüm mevcut buharı hızla tüketebilir ancak diğer malzemeleri tutuşturmaz.

- Buhar bulutu patlaması (VCE): Yanıcı gazların bir bulutu oluşur ve yeterli sınırlama koşulları altında tutuştuğunda patlar.

- ICEV yangınlarında görüldüğü gibi, polistiren, ABS ve diğer reçineler gibi malzemelerin termal ayrışması sırasında benzen, toluen ve etanol gibi çeşitli uçucu bileşenler salınabilir. Yangın söndürme suyu da metaller ve halojenler dahil olmak üzere zararlı maddelerle kirlenebilir.

BEV yangınlarıyla ilişkili önemli risklerden biri, ilk söndürmeden sonra yangının yeniden tutuşma olasılığıdır. Yeniden tutuşma, birincil söndürmeden sonra kalan enerji ve iç paket sıcaklığına bağlıdır. Bu, batarya paketindeki diğer hücrelerin, ilk olay sırasında hasar görmesinin ardından daha sonra termal kaçış durumuna girdiğinde meydana gelir (European Commission, 2025).

Bu tür sonraki yeniden tutuşmalar gerçek dünya testleri (Aimo-Boot ve ark.,2023) sırasında gözlemlenmiş olup, itfaiyecilerin BEV yangınlarını etkili bir şekilde yönetmesini zorlaştırmaktadır (Hynynen ve ark., 2023). Bu zorlukları ele almak için, bazı araç üreticileri, itfaiyecilerin batarya paketlerine doğrudan yangın söndürücülerle erişmesini sağlayan yeni gövde teknolojileri geliştirmekte ve böylece BEV yangınlarını güvenli bir şekilde yönetme ve söndürme yeteneklerini artırmaktadır (European Commission, 2025).

2.1.2. Batarya Yangınlarının Nedenleri

Hasar görmüş pillerin yanma olasılığı daha yüksektir. Genel çercevede, yangına yol açabilecek nedenler 4 ana faktör kategorisi altında toplanabilir (European Commission, 2025) :

- Termal (Isıl) hasar: Lityum-iyon pillerde ısıl hasar yakınlardaki bir yangın gibi dış faktörlerin sıcaklığı yükseltmesiyle meydana gelir. İlk adım, katı elektrolit ara yüzeyi (SEI) film ve elektrolitin sırasıyla 80°C ve 100°C'de ayrışmasıdır; bunlar arasında negatif elektrot ile elektrolit arasındaki kimyasal reaksiyonlar da meydana gelebilir.

- Elektriksel hasar: Elektriksel kötüye kullanım, akımın maksimum enerji depolama sınırını aşması durumunda meydana gelir ve bu durumda enerji ısıya dönüşür. Eğer bu ısı hızla dağıtılamazsa, pil sıcaklığı yükselir, aşırı ısınmaya yol açar ve potansiyel olarak termal kaçışı tetikleyebilir. Kısa devrelerde olduğu gibi bir aşırı akım olayı, aşırı ısı üreterek malzemenin bozulmasına yol açabilecek elektriksel kötüye kullanım durumları yaratır.

- Mekanik hasar: Mekanik hasar, mevcut batarya fiziksel bir darbeye maruz kaldığında, örneğin çarpışmalar veya engellere çarpma gibi durumlarda meydana gelir. Bu, çeşitli sorunlara yol açabilir ve en yaygın olanı kısa devredir. Kısa devre, akımın iletken terminaller üzerinden akmasına neden olarak hücrede ısı oluşturur. Bu ısı hızlı bir şekilde dağıtılmazsa, batarya hücresi termal kaçak durumuna geçebilir.

- Su hasarları: Bataryalı elektrikli araçlar, katı parçacıklara ve suya karşı minimum korumayı sağlamak için sıkı standartlara (UNECE Yönetmeliği n°100 - Revizyon 3, 14 Eylül 2017'den itibaren geçerli değişiklikler ile) uyar. Ancak, çarpışmalar gibi olaylar sonucu hasar görmüş batarya

paketleri, özellikle tuzlu suyun girmesi ve hücreler arasında kısa devreye yol açma riski açısından tehlike oluşturur.

Termal kaçışın yayılma hızı, seçilen güvenlik stratejisinin etkinliği ve pil sisteminde kullanılan malzemelerle doğrudan bağlantılıdır. Hücre, modül veya paket seviyesinde uygulanan sağlam güvenlik stratejileri, termal yalıtım, alev geciktirici malzemeler ve ileri soğutma sistemleri dahil olmak üzere, termal olayların yayılmasını önemli ölçüde yavaşlatır. Ayrıca, Şarj Durumu (SoC) da termal yayılmada büyük bir rol oynayacaktır (European Commission, 2025).

2.1.3. Şarj altyapısıyla ilgili zorluklar ve riskler

BEV şarj altyapısının kurulması aşağıdaki senaryolarda çeşitli riskler içerir:

- Kurulumlar geçerli güvenlik yönetmeliklerine uygun olarak yapılmaz.
- Kurulum yapan kişi BEV şarj tesisatları için gerekli yeterliliğe sahip değildir.
- Kullanılan elektrik ekipmanı uygunsuz veya güvensizdir.
- Bakım veya denetimler düzgün şekilde yapılmaz.
- Araçların kasıtlı olarak zarar görmesi veya tahrip edilmesi gibi Vandalizm olayları.

BEV şarj altyapısı ile ilgili zorlukları ve riskleri daha iyi anlamak için, her birinin kendi yangın riskleri olan dört farklı şarj modu olduğunun bilinmesi önemlidir. Aşağıdaki bilgiler bu modların açıklamasını sunmaktadır (European Commission, 2025):

Mod 1: Bir elektrikli aracın (EV), alternatif akım (AC) tedarik ağına ait standart bir priz çıkışına kablo ve fiş kullanılarak bağlanması. Bunların hiçbiri ek pilot veya yardımcı kontaklarla donatılı değildir.

Not: Amerika Birleşik Devletleri, İsrail ve Birleşik Krallık'ta izin verilmemektedir; İtalya'da halka açık şarj için yasaktır; İsviçre, Danimarka, Norveç ve Almanya'da sınırlıdır.

Koruma Seviyesi:

- Özel olmayan güç prizleri
- Basit kablo
- Aşırı ısınma riski
- Tesisin başlangıç noktasına monte edilmiş olan kaçak akım cihazı dışında başka bir kaçak akım cihazı bulunmayacaktır.

Mod 2: Bir BEV'in, kablo ve fişli bir AC BEV besleme ekipmanı kullanılarak standart bir prize veya güçlendirilmiş bir AC besleme şebekesi prizine bağlanması, standart fiş ile EV arasına yerleştirilmiş bir kontrol pilotu fonksiyonu ve elektrik çarpmasına karşı kişisel koruma sistemi. Tipik taşınabilir/acil durum şarj cihazı.

Not: İtalya'da halka açık şarj için yasaktır; Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, İsviçre, Danimarka, Fransa ve Norveç'te kısıtlıdır.

Koruma Seviyesi:

- Yeni bir özel devre ve özel prizler ile kurulmalıdır.

- Özel kablo (IC-CPD), kontrol ve güvenlik fonksiyonlarını içermelidir.
- IC-CPD akımının ayarı ulusal düzenlemelere bağlıdır.
- IC-CPD, kaçak akım koruma cihazı ve topraklama sürekliliğinin kontrolünü içerir.

Mod 3: Bir BEV'nin, AC şebeke ağına kalıcı olarak bağlı bir AC BEV şarj cihazına, AC BEV şarj cihazından BEV'ye uzanan bir kontrol pilot işlevi ile bağlanması.

Not: İki yönlü iletişimi içerir. Bağlı (kablo kalıcı olarak bağlı) ve bağlı olmayan (yalnızca özel priz) konfigürasyonlar mevcuttur. İşbu Mod, tipik bir halka açık AC şarj cihazı kurulum modudur.

Koruma Seviyesi:

● Şarj ve batarya sıcaklığı izlemeyi içeren özel şarj altyapısı;

● Otopark denetim sistemi ve yangın alarm sistemi ile olası iletişim;

● Özel kablo.

Mod 4: Bir BEV'in, DC BEV besleme ekipmanı kullanılarak AC veya doğru akım (DC) besleme ağına bağlanması, kontrol pilotu işlevinin DC BEV besleme ekipmanından BEV'e uzanmasıyla. Not: Bu, “hızlı şarj”, “ultra hızlı şarj”, “çabuk şarj” ve benzeri terimler için tipik bir kurulumdur.

Koruma Seviyesi:

● Şarj izleme özelliğine sahip özel güç prizi;

● Özel kablo;

● Aşırı akım koruma cihazı dahil.

Yukarıdaki açıklamalarda listelenen unsurlara ek olarak, BEV şarj noktalarıyla ilgili yangın riskleri kısa devreler, aşırı yüklenmeler ve aşırı akımlardan kaynaklanabilir. Fişler ve prizler gibi bileşenlerde polimer alev yayılma malzemelerinin kullanımı bu riski daha da artırır. Ancak, alev yayılmayan ürünlerin kullanılması ve EV şarj noktalarının ilgili EN/HD ve/veya IEC standartlarına uygun şekilde kurulmasıyla bu tehlikeler önemli ölçüde azaltılabilir (MobilityPlus, 2018).

2.1.4. İnsan Güvenliği ve Olay Yerine Müdahale Eden İtfaiyecilerle İlgili Zorluklar ve Riskler

Kapalı alanlarda, özellikle konut binalarında herhangi bir tür araç yangınında olduğu gibi, BEV (Bataryalı Elektrikli Araç) yangınları, sahadaki acil müdahale ekiplerinin güvenliği de dahil olmak üzere insan yaşamı

için önemli tehditler oluşturabilir. Yangınlar, araçlar arasında (hem ICEV (İçten Yanmalı Motorlu Araçlar) hem de BEV) hızla yayılabilir ve bireyleri duman veya alevle park alanlarında sıkışmış şekilde bırakabilir, bu da can kayıplarına yol açabilir. Araç yangınları, ICEV veya BEV fark etmeksizin, toksik gazlar ve maddeler yayar. BEV yangınlarının kendiliğinden toplu toksik gaz emisyonu riski taşımamasına rağmen, BEV'leri de kapsayan yangınlar, hava yollarını tahriş edebilen ve korozyona neden olabilen hidrojen klorür, kükürt dioksit ve hidrojen florür (HF) gibi çeşitli gazlar üretir. HF sadece BEV yangınlarına özgü değildir; ICEV yangınlarında ve evdeki polimerlerde yaygın olarak bulunan florür içeren ürünlerin yanması sırasında da salınır. Aslında HF neredeyse tüm ev yangınlarında mevcuttur ve itfaiye hizmetleri için uzun süredir devam eden bir risk oluşturur. HF ve hidroflorik aside maruz kalma, solunum yoluyla veya cilt yoluyla emilimle gerçekleşebilir. HF gazı da dahil olmak üzere yangın dumanını solumak, ciddi akciğer hasarına yol açabilir ve oksijen emilimini bozabilir (European Commission, 2025).

BEV yangınlarına müdahale ederken, acil durum personelinin, özellikle itfaiyecilerin, ICEV yangınlarına kıyasla (özellikle de BEV'in batarya paketi termal kaçış yaşadigi durumlarda) farklı stratejiler kullanması gerekir. Farklılıklarına rağmen, BEV'ler ve ICEV'ler arasında tasarım açısından önemli benzerlikler bulunmaktadır; bu da modern araçların daha yanıcı malzemeler içermesi nedeniyle kapalı otopark alanlarında itfaiyeciler için benzer riskler oluşturur ve artan yanıcılık ile yayılan toksik buharlara yol açar. Bu vb. durumlar göz önüne alınarak itfaiyeciler, BEV yangınlarına yönelik stratejiler sürekli geliştiği için, her yangın durumunu dikkatlice değerlendirerek en uygun yöntemleri, taktikleri ve teknolojileri seçmelidir. Araç yangını müdahaleleri sırasında güvenliği sağlamak için itfaiyeciler, araçları açık hava ortamına taşımak için çekici ekipman kullanabilir, ancak bu yalnızca aracın termal kaçış durumunda olmaması halinde mümkündür. BEV yangınlarına müdahale ederken, acil durum personelinin, özellikle itfaiyecilerin, ICEV yangınlarına kıyasla (özellikle de BEV'in batarya paketi termal kaçış yaşadigi durumlarda) farklı stratejiler kullanması gerekir. Bu tür operasyonlar, görüş, sıcaklık koşulları ve tekrar yangın çıkma riskinin yönetimi gibi faktörlere bağlıdır. Ayrıca, lityum ve su kombinasyonu yanıcı hidrojen üretebileceğinden itfaiye çalışmalarını daha da karmaşık hale getirir. Bataryaların ve yüksek voltajlı devrelerin yakınında güvenli mesafeyi korumak ve 1.000 voltluk eldivenler gibi koruyucu ekipman kullanmak kritik öneme sahiptir. EV'lerde yüksek DC voltaj taşıyan canlı kablolarla temas ölümcül elektrik çarpmasına yol açabilir; yaralanmanın şiddeti, akım şiddeti, voltaj, iletken yol ve maruz kalma süresi gibi faktörlere bağlıdır (European Commission, 2025).

2.1.5. Otopark İşletmecileri ve Bina Sahipleri İçin Zorluklar ve Riskler

Elektrikli Araçlar (BEV'ler) Avrupa'daki karayollarında giderek yaygınlaştıkça, otopark işletmecileri ve bina sahiplerinin, BEV'lere yönelik otopark olanakları ve şarj altyapısı gibi temel hizmetleri sağlayarak yangın güvenliğini öncelikli hale getirmesi gerekliliği ortadadır. Bu paydaşlar için önemli bir endişe, BEV'lerin ve İçten Yanmalı Motorlu Araçların (ICEV) güvenli şekilde park edilmesini sağlamaktır; özellikle binaların altındaki veya bitişiğindeki kapalı alanlarda bu durum büyük önem taşır. Bu, kamu güvenliğinin sağlanması açısından hayati öneme sahiptir. BEV'lerin kabul edilmesi, otopark işletmecileri ve bina sahipleri için özellikle bina inşaatı ve tasarımındaki çeşitlilik göz önüne alındığında benzersiz zorluklar oluşturmaktadır (European Commission, 2025).

Hem mevcut hem de hızlı yükselen yeni yapılara uygun tutarlı yangın güvenliği standartları oluşturmak zordur, çünkü bazı önleyici tedbirler mevcut binalarda uygulanabilir değildir. İçten yanmalı motorlu araçlar (ICEV'ler) ve bataryalı elektrikli araçların (BEV'ler) araç boyutlarının artması sorunu daha da kötüleştirerek mevcut alanı azaltmakta ve yangının yayılma ve yapısal hasar riskini artırmaktadır (Hynynen ve ark., 2023).

2.2. Otopark Tasarımı ve Lojistik Güvenliği

Elektrikli bir araç yangın çıkardığında, ısı salım hızı genellikle bir içten yanmalı araçtaki ısı yayım hızından önemli ölçüde farklılık göstermez, bu nedenle geleneksel (içten yanmalı araçlar için) otoparklara uygulanabilir ulusal düzenlemeler tarafından istenen taşıyıcı yapıların yangına dayanıklılığı genellikle yeterli kabul edilebilir. Şarj istasyonlarının kurulu olduğu kapalı alanlar, yangının, dumanın ve gazların diğer bölgelere yayılmasına karşı uygun şekilde korunmalıdır. Bir EV şarj istasyonu kurulu olan herhangi bir kapalı alanda sigara içmek, açık alev kullanmak, sıcak işler yapmak, yanıcı sıvıları taşımak, yanıcı sıvı ve/veya gaz depolamak yasak olmalıdır. Uygun işaretler, açıkça görülebilecek yerlere yerleştirilmelidir. Tüm EV şarj istasyonları ve tüm yangın güvenliği sistemleri ile cihazları, ulusal ve/veya yerel standartlar ve üretici talimatlarına göre düzenli ve periyodik olarak denetlenmelidir. (CFPA Europe, 2025).

2.3. Tersine Lojistik ve EoL (Kullanım Ömrü Sona Eren) Batarya Yönetimi

EV batarya ters lojistiğinin merkezinde, tüm sistemin verimliliğini belirleyen temel unsur olan karmaşık toplama ve taşıma süreci yatmaktadır. Özel lojistik ağları, geniş coğrafi bölgelerdeki bayiler ve araç servis merkezleri gibi çeşitli noktalardan kullanım ömrü bitmiş pilleri toplamak için tasarlanmıştır. Bu sistemler, kaynak noktalarında birikmeyi ve potansiyel güvenlik risklerini önlemek için pillerin zamanında geri alınmasını sağlamak için lojistik zorlukları aşmalıdır. Taşıma sırasında güvenlik, lityum-iyon pillerin tehlikeli doğası nedeniyle çok önemlidir; yanlış kullanılırsa yangın veya sızıntı riski oluşturabilir. ADR (Tehlikeli Yüklerin Karayoluyla Uluslararası Taşınması Anlaşması) gibi uluslararası standartlara uyum tartışmasızdır ve gelişmiş paketleme çözümleri ile eğitimli personel gerektirir (Lavaile, 2025).

3. SONUÇ

Avrupa'da Fit for 55 paketi ve revize edilmiş EPBD gibi iddialı yasal çerçevelerle teşvik edilen BEV'lerin hızlı büyümesi, kapalı otopark alanları için kapsamlı yangın güvenliği yönergelerini gerektirmektedir. Mevcut çalışmalar BEV'lerin ICEV'lere kıyasla yangına daha az yatkın olduğunu öne sürse de, bu tür risklerin yeterince değerlendirilmesini sağlayacak istatistiksel bilgiler şu anda yetersizdir; bu da yangın güvenliğini sağlamak için etkili önlemlerin tespitini zorlaştırmaktadır. BEV'lerin ve bunlara bağlı şarj altyapısının artan yaygınlığı, proaktif olarak ele alınması gereken yeni yangın güvenliği hususlarını gündeme getirmektedir. Sonuç olarak, elektromobiliteye geçişin birçok çevresel faydasının yanında, kapalı otoparklarda yangın yönetimi uygulamalarının uyarlanması gibi yeni zorlukları da beraberinde getirdiği görülmektedir. Bu zorlukları kapsamlı rehberler, sürekli risk değerlendirmeleri ve proaktif iş birliği ile araştırmalar yoluyla ele alarak, Avrupa'da (ve küresel anlamda) elektromobilite için güvenli ve sürdürülebilir bir geleceği temin edebiliriz (European Commission, 2025).

Bu referanslar göz önüne alınarak özellikle de Kocaeli gibi Asya ve Avrupa'yı birbirine bağlayan kritik şehirlerde kurulacak lojistik üsleri, tesisler, kapalı otoparklar ve diğer tüm yapılaşmalarda bu hususlarında dikkate alınması yerinde olacaktır. Yine bu referanslar, özellikle Türkiye'de Marmara ve Almanya'da Ruhr Bölgesi gibi yüksek nüfuslu, yapı yoğunluğunun ve lojistiğin fazla olduğu alanlarda, sadece araç yapısı değil aynı zamanda otopark tasarımı, araç konumlanması, havalandırma ve Lityum-iyon batarya akış yönetiminin yangın risklerinin nasıl minimize edilebileceğini doğrulamaktadır.

4. TARTIŞMA

Bataryalı Ellektrikli araçlara geçişin birçok çevresel fayda sağladığını gözlemlemek mümkünken, kapalı otopark alanlarında yangın güvenliği ile ilgili sorunları da da beraberinde getirmesi kaçınılmaz. Ancak bu sorunlarla detay içeren yönergeler, iş birliği ve araştırma içeren çalışmaları gerçekleyerek güvenli ve sürdürülebilir bir gelecek sağlayabileceğimizi öngörebiliriz.

KAYNAKLAR

Aimo-Boot, M., Pazzi, M., Maurino, V., & Malaspina, F. (2023), Li-ion battery full scale thermal runaway test: Environmental and personnel exposure influence in case of rescue operations10 Kasım 2025 tarihinde https://bibliotek.vti.se/bib/291807 adresinden alındı.

CFPA Europe (2025), *Fire safety recommendations for electric vehicles — CFPA-E Guideline No. 44*. Confederation of Fire Protection Associations Europe1 Aralık 2025 tarihinde https://cfpa-e.eu/app/uploads/2025/06/CFPA_E_Guideline_No_44_2025_F.pdf adresinden alındı

European Commission (2025), *Guidance on fire safety for electric vehicles parked and charging infrastructure in covered parking spaces*. 8 Kasım 2025 tarihinde https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c2c1f892-f3ef-11ef-b7db-01aa75ed71a1/language-en adresinden alındı.

Franke, M. (2025), New Euralarm guidance document on fire safety of EV parking garages. Euralarm 1 Aralık 2025 tarihinde https://www.euralarm.org/resource/new-euralarm-guidance-document-on-fire-safety-of-ev-parking-garages.html adresinden alındı.

Hynynen, J., Quant, M., Pramanik, R., Anna, O., Ying Zhen, L., Arvidson, M., & Andersson, P. (2023), *Electric vehicle fire safety in enclosed spaces*, 10 Kasım 2025 tarihinde https://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1744882/FULLTEXT01.pdf adresinden alındı.

Lavaile, R. (2025), EV battery reverse logistics – Review. BI Advisor. Management Curated 1 Aralık 2025 tarihinde https://managementcurated.com/operations/ev-battery-reverse-logistics-review/ adresinden alındı.

MobilityPlus (2018), *De verschillende technieken van laden: Mode 1, 2, 3 en 4*., 10 Kasım 2025 tarihinde https://www.mobilityplus.be/en/blog/the-various-charging-technologies-modes-1-2-3-and-4 adresinden alındı.

NIPV (2022), *Annual report 2022*. Netherlands Institute for Public Safety. 8 Kasım 2025 tarihinde https://www.nipv.nl/publicaties/annual-report-2022 adresinden alındı.

NIPV (2023), *Annual report 2023*, 8 Kasım 2025 tarihinde https://www.nipv.nl/publicaties/annual-report-2023 adresinden alındı.

Norwegian Directorate for Civil Protection (2021), *Guidelines for fire and rescue services: Risk assessment and handling of fire in lithium-ion batteries* (Version 1), 10 Kasım 2025 tarihinde https://firerescue.ro/wp-content/uploads/BIBLIOGRAFII/Risk-Assessment-Handling-of-Fire-in-Lithium-ion-Batteries-Norway-NORWEGIAN-CIVIL-DEFENCE-2021EN.pdf adresinden alındı.

Smol, N. (2023, March 30), *Why electric car fires are hard to extinguish*. Fire Isolator, 7 Kasım 2025 tarihinde https://fireisolator.com/why-electric-car-fires-are-hard-to-extinguish/ adresinden alındı.

Troitzsch, J. H. (2022), *Electrical applications in Internet of things and e-vehicles: Passive fire safety needs and solutions*. *Journal of Fire Sciences*. 8 Kasım 2025 tarihinde https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/07349041221108643 adresinden alındı.

ŞEKİL BAĞLI SAC BAĞLANTILARININ İNCELENMESİ

SEMİH ÖZKAN AKDOĞAN
İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi
ozkanakdogan@outlook.com

YUSUF CAN AKTAY
İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi
yusufcanaktay@outlook.com

FEVZI DENİZ YENİGÜN
İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi
fevzi.deniz5334@gmail.com

ERGİN METİN
BEKO Çamaşır Makinası Fabrikası, Ar-Ge Merkezi
ergin.metin@beko.com

ATA MUĞAN[1]
İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi
mugan@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada şekil bağlı sac bağlantı yöntemleri ve alternatifleri araştırılmış, plastik şekil değiştirme yöntemi ile gerçekleşen form punta yöntemi üzerinde sayısal yöntemler kullanılarak ABAQUS programında analizler gerçekleştirilmiştir. Son yıllarda form punta yöntemi ilave malzeme gerektşrmeden bağlantı sağladığı için çeşitli sektörlerde diğer şekil bağlı birleştirme yöntemlerinin yerine tercih edilmektedir. Giderek yaygınlaşan bu yöntemin teorisi üzerinde daha fazla çalışılmasına ihtiyaç vardır. Temelde ürün kalitesine etki eden parametrelerin belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu sebeple bu çalışmada kalıp geometrilerinin, sac metalleri arası sürtünme katsayısının ve sac kalınlıklarının prosese etkileri incelenmiştir. Plastik şekil değiştirme içeren sonlu eleman analizlerinde kullanılan malzeme modelleri ve hasar modelleri incelenmiş, hazırlanan bir parametrik model üzerinden sonlu elemanlar analizleri ile deney tasarımı yapılmıştır. Taguchi yöntemi kullanılarak yapılacak prosesi etkileyen kalıp geometrisi parametrelerini derecelendirebilmek için gerekli analiz sayısı belirlenmiştir. Yapılan dinamik-açık (explicit) sonlu elemanlar analizleri ile form punta prosesi plastik malzeme davranışı ile birlikte simüle edilmiştir. Sayısal modellerde incelenen parametreler olarak malzeme cinsi, flanş kalınlığı, flanş yüksekliği takım cinsi ve geometrisi, takım-parça ara yüzey etkileşimi ve çevre koşulları dikkate alınmıştır. İncelenen parametreler 11 tanedir: zımba çapı, zımba köşe yarıçapı, zımba duvar açısı, kalıp genişliği, kalıp iç genişliği, alıp iç yarıçapı, kalıp derinliği, kalıp duvar açısı, kalıp kanal yarıçapı, kalıp dış yarıçapı ve kalıp kanalı eğim açısıdır. Analizlerde "arbitrary Lagrangian Eulerian" (ALE) yöntemi kullanılmıştır. Punta bölgesi üzerinde hasar meydana gelme ihtimali yüksek olan bölgelerde hasar kontrolü yapılmıştır. Malzeme modeli olarak Cowper-Symonds malzeme modeli ve hasar kontrolü için Cockcroft-Latham hasar kriteri kullanılmıştır. Sürtünme katsayısının, kalıp geometrisinin ve sac kalınlıklarının hasar oluşumuna etkileri belirlenmiştir. Analizlerden elde edilen bulgulara göre uygun punta geometrisi ile çamaşır makinesi gövde sacı ile yay askı braketi arasındaki punta bağlantısının dayanımı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Proses iyileştirmesinin ekonomik etkileri Türkiye'de üretilen çamaşır makineleri üzerinden incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar yöntemi, şekil bağlı bağlantılar, metal şekillendirme.

[1]**:** *Sorumlu yazar*

INVESTIGATION ON SHAPE DEPENDENT JOINTS

Abstract

This study investigates form-based sheet metal joining methods and their alternatives. Analyses were performed in the ABAQUS program using numerical methods on the form spot welding method, which is achieved through plastic deformation. In recent years, the form spot welding method has been preferred over other form-based joining methods in various industries because it provides a connection without requiring additional material. There is a need for further research on the theory of this increasingly popular method. It is important to determine the parameters that fundamentally affect product quality. For this reason, this study examined the effects of mold geometries, the friction coefficient between sheet metals, and sheet thicknesses on the process. Material models and damage models used in finite element analyses involving plastic deformation were examined, and experimental designs were created using finite element analyses based on a prepared parametric model. The number of analyses required to rank the mold geometry parameters affecting the process using the Taguchi method was determined. The form punch process was simulated together with the plastic material behavior using dynamic-explicit finite element analyses. The parameters examined in the numerical models included material type, flange thickness, flange height, tool type and geometry, tool-part interface interaction, and environmental conditions. Eleven parameters were examined: punch diameter, punch corner radius, punch wall angle, die width, die inner width, die inner radius, die depth, die wall angle, die channel radius, die outer radius, and die channel slope angle. The "arbitrary Lagrangian Eulerian" (ALE) method was used in the analyses. Damage control was performed in areas with a high probability of damage occurring on the punch region. The Cowper-Symonds material model and the Cockcroft-Latham damage criterion were used for damage control. The effects of the friction coefficient, mold geometry, and sheet thickness on damage formation were determined. Based on the findings obtained from the analyses, the strength of the spot weld connection between the washing machine body sheet and the spring suspension bracket was examined using the finite element method with the appropriate spot weld geometry. The economic effects of process improvement were examined based on washing machines produced in Turkey.

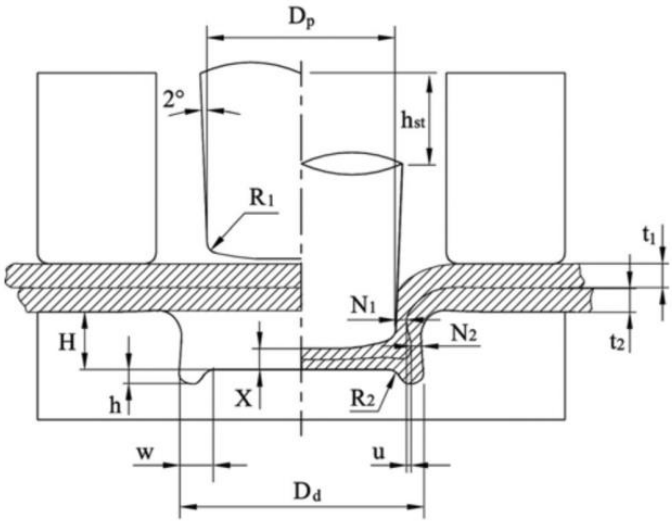
Keywords: Finite element methods, shape dependent joints, metal forming.

1. GİRİŞ

Sac malzemeler havacılık, otomotiv ve beyaz eşya gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte gelişmiş malzemelerin üretilmesi ve yeni birleştirme yöntemleri kullanılarak bu sorunlara çözüm aranmaktadır. Bu sebeple mevcut birleşim yöntemlerini geliştirmek ve yeni birleşim yöntemleri bulmak gerekmektedir.

Günümüzde sac parçaları birleştirmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin çeşitli avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Form punta (FP) yöntemi ise düşük maliyet, hız ve otomatikleştirilebilme avantajları sayesinde ön plana çıkmaktadır. Son yıllarda FP yöntemi ile ilgili yapılan çalışmalarda artış görülmektedir. Bu gereklilik prosese etki eden parametrelerin fazlalığı ve prosesi tanımlayan matematiksel modellerin oluşturulmasının zorluğundan kaynaklanmaktadır. BTM, TOX Gmbh, Jurado, Bollhoff Attexor SA gibi teknoloji sağlayıcıları tarafından geliştirilmekte olan FP yöntemi Audi, BMW, Chrysler, Fiat, Ford gibi firmalar tarafından hâlihazırda en popüler yöntem olan direnç nokta kaynağına rağmen benimsenmeye başlanmıştır [1].

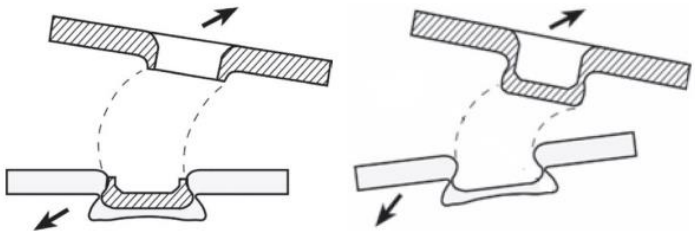
FP yönteminin kalitesini etkileyen belirli faktörler bulunmaktadır. Bunlar arasında en öne çıkanlar Şekil 1.1'de de görüldüğü gibi levhalar arasındaki girişim (u), levhalardaki incelme (N1, N2) ve alt kalınlıktaki (X) azalmadır. Bu faktörler de büyük oranda takım geometrisinden etkilenmektedir [2].



R1 : punch corner radius
R2 : groove corner radius
Dp : punch diameter
Dd : die diameter
H : die depth
X : Bottom thickness
u : Undercut
h : groove depth
w : groove width
t1 : punch side sheet thickness
t2 : die side sheet thickness
hst : punch stroke
N1 : Neck 1
N2 : Neck 2

Şekil 1. Geometrik boyutlar [1].

Brani ve Benzegaou yaptıkları FEM çalışmasında sürtünme, malzemenin mekanik karakteristiği ve takım geometrisinin etkisini incelemişlerdir. Bu parametrelerin doğru birleşim formasyonunu oluşturması ve bağlantının mekanik dayanım sağlaması açısından önemli olduğunu ortaya koymuşlardır [3]. Abe ve arkadaşları yaptıkları deneysel çalışmada sıcak daldırma ile çinko kaplanmış çeliğin form punta ile birleştirilmesinin verimli bir yöntem olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca bu çalışmada zımbanın köşe radyusunun artması ile alt tabaka kalınlığının arttığı ve mekanik kenetlenmenin azaldığını gözlemlemişlerdir. Kalıp oluğunun yetersiz olduğu durumlarda mekanik kenetlenmenin gerçekleşmediği ve kalıp derinliğinin belirli bir seviyeye kadar mekanik kenetlenmeyi artırdığı da sonuçlar arasındadır [4]. FP bağlantısının boyun çatlaması ve düğme ayrılması olarak iki tane hasar modu vardır. Boyun kalınlığının ince olması boyun çatlamasına sebep olurken levhalar arasındaki girişimin yeterli olmaması düğme ayrılmasının gerçekleşmesine neden olur [5]. Bu modlar Şekil 1.2'de temsili olarak görülmektedir.



(a) Neck fracture mode (b) Button separation mode

Şekil 2. FP hasar modları [5].

2. MATERYAL VE METOD

2.1 Malzeme Modelleri

Malzeme modelleri yapılacak olan deneyin amacına göre malzemenin nasıl davranacağı, hangi yük altında ne tür tepki verip şekil değiştireceği, ne kadar sürede özelliklerini kaybetmeden kalabileceği ve performansının zaman içinde nasıl değişebileceği hakkında bilgi vermesi açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmada Ludwik Malzeme Modeli kullanılmıştır. Model, sabit sıcaklık ve şekil değişimi hızı durumlarında geçerli malzeme modelidir. Eşdeğer gerilmenin değişimi aşağıdaki denkleme göre elde edilmektedir [6].

$$\sigma = Y + H\varepsilon^n \tag{1}$$

Burada Y akma dayanımı, H malzemeye bağlı dayanım katsayısı, n birim şekil değişimi sertleşmesi faktörü ve ε eşdeğer plastik birim şekil değişimidir.

2.2 Hasar Modelleri

FP yöntemi ile şekil verilen saclarda pekleşme gerçekleşir. Bu sebeple standart numune üzerine uygulanan çekme testi ile elde edilen akma dayanımı, FP yönteminde hasar tespiti için doğrudan uygulanamaz. Hasar kontrolünde sac şekillendirme yöntemlerinde kullanılan çeşitli sünek hasar kriterleri mevcuttur. Sünek hasar kriterleri deneysel çalışmalara dayanmaktadır. Bu çalışmada Cockcroft Latham Hasar Modeli kullanılmıştır. Birikimli hasar teorisine dayanan Cockcroft-Latham hasar kriteri çeşitli yükleme koşullarında başarılı sonuçlar vermektedir. Aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$C = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \left(\frac{\sigma_T}{\bar{\sigma}}\right) d\bar{\varepsilon} \tag{2}$$

Burada, $\bar{\sigma}$ eşdeğer gerilme, $d\bar{\varepsilon}$ artımlı efektif birim şekil değiştirme (increment of effective strain), $\bar{\varepsilon}_f$ şekil değişimi işlemi sonucunda eşdeğer şekil değiştirmelerin toplamı, σ_T maksimum çekme gerilmesi ve C belirli malzeme için bir sabit şeklindedir. Hesap sonucunda malzeme için verilen C sabitinden yüksek bir değer elde edilmesi malzemenin hasara uğradığını gösterir [7].

2.3 Taguchi Yöntemi

Taguchi, deney tasarımlarını daha kolay bir hale getirmak amacıyla Dr. Taguchi tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir [8]. Bu yöntem birden fazla değişkenin çalışma üzerindeki etkisini minimum deneme sayısıyla elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca tasarım sürecinde kaliteyi arttırarak maliyeti düşürmeye yardımcı olmaktadır. Taguchi yöntemi, prosesteki tüm parametreleri az sayıda deneyle incelemek için tüm parametrelerin aynı anda değiştirildiği mümkün olan en kısa kombinasyon matrisi tasarımını sunmaktadır [9].

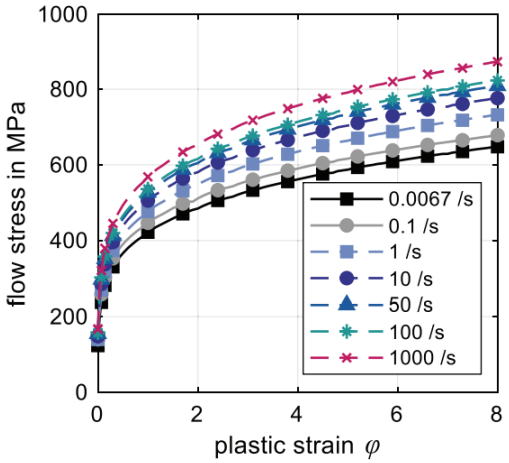
Bu çalışmada ABAQUS programı tercih edilmiştir. Analiz dairesel simetrik olduğundan 3B tasarım gerçekleştirmek yerine 2B aksisimetrik olarak modellenerek hesaplama ve zaman maliyetinin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Yapılan analizlerde oluşacak geometrik form ve hasar bölgeleri tespit edilmeye çalışıldığı için geometri kabuk tipinde değil katı tipinde oluşturulmuştur. Yüksek deformasyonlardan kaynaklanan hataları gidermek için ‘’Adaptive Lagrangian Eulerian’’ (ALE) metodu yüksek deformasyon olan bölgelerde aktif edilmiştir. Explicit çözücüde hesaplanan minimum zaman adımı çok küçük çıktığı durumlarda analizin fiziksel yapısını bozmayacak şekilde ‘’mass scaling’’ uygulanarak analizin hızı arttırılmaya çalışılmıştır.

3. SONUÇ

Bu çalışmada kullanılacak olan sac malzeme, beyaz eşya ve otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılan DC01 çeliğidir [10]. Aşağıda yer alan tablodaki gerçek gerilme ve birim şekil değişimi değerleri farklı birim şekil değişimi hızlarında verilmiştir. Bu tabloda elde edilen veriler 0.3 plastik gerinmeye kadar çekme testinden elde edilmiştir. Daha yüksek plastik birim şekil değişimi değerleri için Ludwik denklemi kullanılarak eğri extrapole edilmiştir [10]. Elastite modülü E= 200GPa, Poison oranı υ= 0,3 ve yoğunluk ρ= 7850 kg/m3 olarak standart çelik özellikleri olarak belirlenmiştir. Hasar modeli olarak Normalize Cockroft Latham modeli kullanılmıştır ve kritik değer literatürden 2 olarak bulunmuştur [11]. Modeldeki parametrelerin az olması, literatürden bulunabilmesinin kolay olması ve metal şekillendirme analizlerinde tercih ediliyor olması Cockroft Latham modelinin tercih edilme sebepleridir. Yaygın olarak kullanılan biçimleme kısıtı eğrilerinin tercih edilmeme sebebi Abaqus'un eksenel simetrik modellerinde bu hasar modelini desteklemiyor olmasıdır. Zımba ve kalıp analitik rijit olarak modellenmiştir.

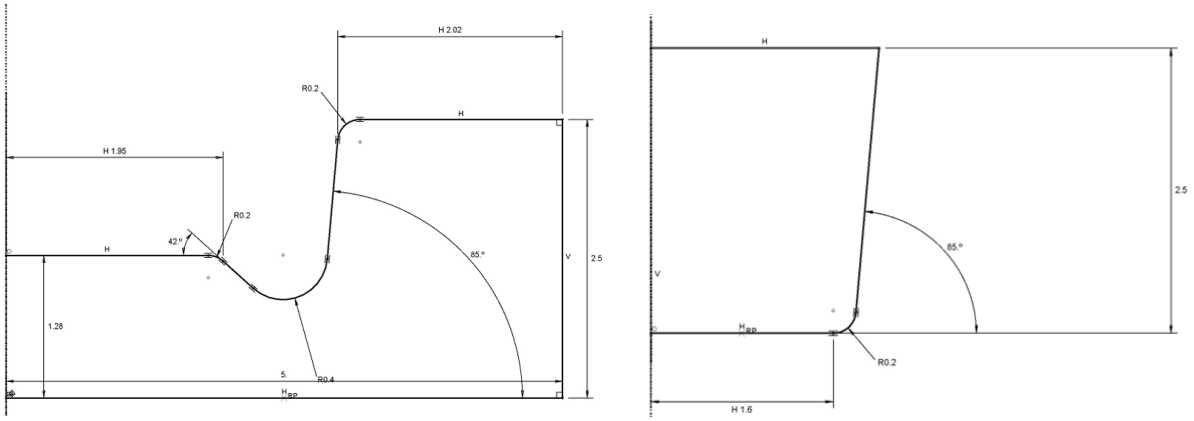
Bu çalışmada kullanılacak olan sac malzeme, beyaz eşya ve otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılan DC01 çeliğidir [10]. Şekil 3'de gerçek gerilme ve birim şekil değişimi değerleri farklı birim şekil değişimi hızlarında verilmiştir. Bu tabloda elde edilen veriler 0.3 plastik gerinmeye kadar çekme testinden elde edilmiştir. Daha yüksek plastik birim şekil değişimi değerleri için Ludwik denklemi kullanılarak eğri extrapole edilmiştir [10]. Elastite modülü E= 200GPa, Poison oranı υ= 0,3 ve yoğunluk ρ= 7850 kg/m^3 standart çelik özellikleri belirlenmiştir. Hasar modeli olarak Normalize Cockroft Latham modeli kullanılmıştır ve kritik değer literatürden 2 olarak bulunmuştur [11]. Modeldeki parametrelerin az olması, literatürden bulunabilmesinin kolay olması ve metal şekillendirme analizlerinde tercih ediliyor olması Cockroft Latham modelinin tercih edilme sebepleridir. Yaygın olarak kullanılan biçimleme kısıtı eğrilerinin tercih edilmeme sebebi Abaqus'un aksisimetrik modellerinde bu hasar modelini desteklemiyor olmasıdır. Zımba ve kalıp analitik rijit olarak modelleneceği için herhangi bir malzeme modeline ihtiyaç duymamaktadır.

Kalıp parçasının tüm serbestlik dereceleri kısıtlanarak sabitlenmiştir. Sac parçalar da dış kenarlarından sabitlenmişlerdir. Zımbaya verilen dikey yöndeki yer değiştirme ile işlem gerçekleştirilmektedir. İşlem süresi 0,1 saniye olarak belirlenmiştir ve toplam zımba yer değiştirmesi 2.7 mm olarak belirlenmiştir. Takım ve saclar arasındaki teması tanımlamak için 'Interaction' modülünden kontakt tanımlamaları yapılmıştır. Parçalar arasındaki sürtünme katsayısı 0,1 olarak ayarlanmıştır ve mekanik kısıtlama fonksiyonu olarak 'penalty contact method' kullanılmıştır.

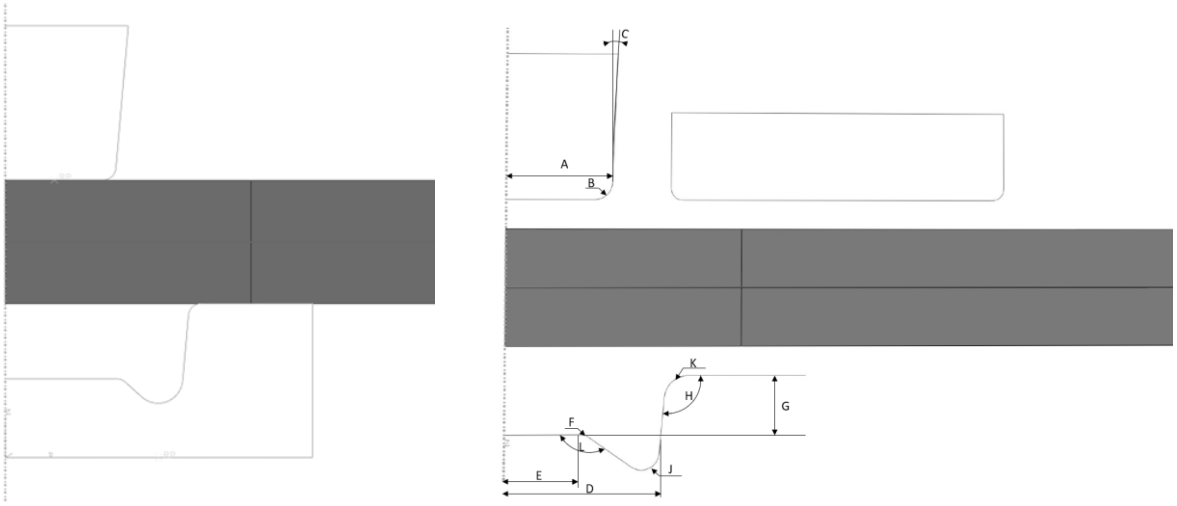


Şekil 3. DC01 şekil değişimi hızına bağlı malzeme eğrisi.

Oluşturulan geometriler montaj modülü ile Şekil 6'daki gibi birleştirilmiştir.



Şekil 4. İlk modelin kalıp geometrisi (solda) ve zımba geometris (sağda).



Şekil 5. Parçaların montajlanmış hali ve geometrik parametreler.

Öncelikle uygun ağ yapısını belirlemek için 1 mm kalınlığında ve 12 mm yarıçapında sac parçalar oluşturuldu. Sac parçaların 4mm'lik yarıçapındaki kısmında daha ince ağ yapısın oluşturulmuştur. Kalınlık boyunca 30 eleman ve 4mm'lik yarıçap boyunca sırasıyla 75, 125,150, 200, 300 ve 400 elemanlık ağ yapısı oluşturulmuştur. Dış bölgede uzunluk boyunca eleman uzunluğu 0.2 mm olarak belirlenmiştir. Eleman tipi olarak ''CAX4R: A 4-node bilinear axisymmetric quadrilateral, reduced integration, hourglass control'' elemanı tercih edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda boyun bölgesindeki elemanların yakınsaması dikkate alınmıştır. Çizelge 3.1 de görüldüğü üzere 200 ve 300 eleman arasında %3,65'lik bir fark bulunduğu içi 300 elemanda yakınsamanın gerçekleştiği kabul edilmiştir.

Çizelge 1. Ağ yapısı yakınsama sonuçları.

Eleman Sayısı	**75**	**125**	**150**	**200**	**300**	**400**
Maksimum Gerilme [MPa]	695,02	620,134	609,347	528,952	548,313	524,736

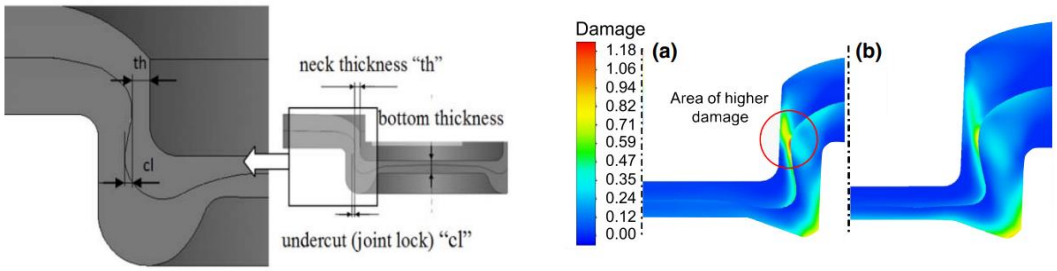
Taguchi yöntemi kullanılarak kalıp geometrisinin FP bağlantısına etkisi incelenmiştir. Kalıpta ve zımbada toplam 11 parametre olduğu için L27 ortogonal matrisinin kullanılması uygundur. Şekil 5'de sağda görüldüğü gibi parametrelerin üçü zımbaya geri kalan sekizi ise kalıba aittir. 27 farklı geometriyi hata olmaksızın oluşturabilecek şekilde her bir parametre için 3 seviye belirlenmiştir. Bu seviyeler Çizelge 2'deki gibidir. Her simülasyonda işlem sonucunda taban sac kalınlığı toplam sac kalınlığının %30'u kadar olacak şekilde zımbaya yer değiştirme sınır koşulu tanımlanmıştır. Kullanılan parametreler A zımba çapı, B zımba köşe yarıçapı, C zımba duvar açısı, D kalıp genişliği, E kalıp iç genişliği, F kalıp iç yarıçapı, G kalıp derinliği, H kalıp duvar açısı, J kalıp kanal radyusu, K kalıp dış yarıçapı ve K kalıp kanalı eğim açısıdır.

Çizelge 2: Parametrelerin seviyelendirilmesi.

Seviye	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L
Seviye 1	1,8	0,2	0	2,6	1,3	0,2	1	92	0,2	0,3	135
Seviye 2	1,9	0,3	2	2,7	1,4	0,4	1,2	95	0,3	0,4	140
Seviye 3	2	0,4	4	2,8	1,5	0,6	1,4	98	0,4	0,5	145

4. TARTIŞMA

Yapılan simülasyonlarda ilk yapılan simülasyona ek olarak ekstra bir adım tanımlanmıştır. Bu adımda alttaki sac sabitlenerek üstteki saca yukarı yönlü bir kuvvet uygulanarak bağlantının ayırma kuvveti hesaplanmıştır. Ayrıca işlem sırasında sacların sabitliğini sağlamak için bir tutucu da montaja ilave edilmiştir. Ayırma kuvvetiyle birlikte boyun kalınlığı (t_n), kenet kalınlığı (t_s) (Şekil 6'da sırasıyla th ve cl olarak gösterilmiştir [13].), Şekil 6'da gösterilen boyun ve kalıp kanalı bölgesindeki hasar oluşumu hesaplanarak parametrelerin etkisi incelenmiştir [14]. Hasar oluşumunun değerlendirilmesi için Normalize Cockroft Latham Kriteri (C_d) kullanılmıştır. Emniyetli bölgede kalmak açısından 1.7'nin üstündeki değerler hasarlı olarak kabul edilmiştir. Buna ek olarak Malzeme sünekliğin, sürtünmenin ve sac kalınlığının etkisi de Taguchi yöntemi kullanılmaksızın irdelenmiştir. Elde edilen bulgular sonuçlar kısmında verilmiştir.



Şekil 6. FP kalite parametreleri (solda) ve hasar görülme ihtimali yüksek bölgeler (sağda).

Sac kalınlığının etkisini incelemek için simülasyonlardaki sac kalınlıkları 0.7 mm'ye indirilerek analizler tekrardan gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucu sac kalınlığı inceltilen parçalarda kenet oluşumunda büyük miktarda azalma gözlenirken boyun kalınlığındaki azalmanın oranı daha düşük olarak gözlemlenmiştir. Sürtünmenin etkisini incelemek adına sürtünme değerleri 0,2 ve 0,4 olarak ayarlanıp simülasyon yapılmıştır. Sürtünme boyun kalınlığı ve kenet kalınlığı açısından pozitif etkiye sahip iken saclarda hasar meydana gelme ihtimalini arttırmaktadır. Sürtünme düşük iken kritik bölgelerde olan parçalar sürtünmenin yükseldiği durumlarda hasara uğrayacaktır. Bu çalışmada FP işleminin kalitesine temel olarak etki eden boyun kalınlığı ve kenet kalınlığının parametrelere göre değişimi irdelenmiştir. Boyun kalınlığı kalıp derinliği, zımba köşe radyusu, kalıp genişliği, zımba çapı, kalıp iç genişliğinden etkilendiği; kalıp

derinliği ve zımba çapı arttıkça boyun kalınlığının azaldığı, diğerleri artırılınca boyun kalınlığının arttığı ortaya konmuştur. Kenet miktarını arttırmak için kalıp derinliğinin arttırılması, kalıp duvar açısının azaltılması, zımba açısının azaltılması, zımba yarıçapı ve zımba köşe radyusunun optimum değerde tutulması gerekmektedir. Kalıp derinliğini arttırmak ve zımba yarıçapını optimum değere getirmek boyun kalınlığını azaltır. Bu sebeple kenet miktarını arttırırken boyun incelmesinin yaşanacağı göz ardı edilmemelidir. Mümkünse önce kenet miktarını etkilemeyen parametreleri boyun kalınlığını arttıracak şekilde ayarlama yapılması önerilmektedir.

Sac kalınlığı azaltıldığında kalıp kanalı bölgesinde hasar riski azalmakla beraber boyun bölgesindeki hasar riski artmaktadır. Kalın haldeyken kritik bölgede bulunan malzeme inceltildiğinde hasara uğrayacaktır. Bu sebeple boyun bölgesindeki hasar parametresini düşürecek şekilde kalıp optimizasyonu yapılmalıdır. Kenet kalınlığı sağlanamadığı durumlarda zımba yer değiştirmesinin artırılması tavsiye edilmektedir çünkü zımba yer değiştirmesinin artırılması boyun bölgesi hasar parametresinde ciddi artışlara sebep olmamaktadır. Sürtünme katsayısının arttırılması kenet kalınlığı ve boyun kalınlığı üzerinde pozitif etkiye sahipken boyun ve kalıp kanalı bölgesinde hasar meydana gelme ihtimalini arttırdığı ortaya konulmuştur. Bu sebeple FP işlemi öncesinde yağlama yapılması tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Qin, D., Chen, C., Ouyang, Y., Wu, J., & Zhang, H. (2021). Finite element methods used in clinching process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *116*, 2737-2776.

[2] Eshtayeh, M. M., Hrairi, M., & Mohiuddin, A. K. M. (2016). Clinching process for joining dissimilar materials: state of the art. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *82*, 179-195.

[3] Benabderrahmane, B., & Ali, B. (2013). Finite element analysis of the parameters affect the mechanical strength of a point clinched. *Int. J. Eng. Res. Technol*, *2*, 795-799.

[4] Abe, Y., Kishimoto, M., Kato, T., & Mori, K. (2009). Joining of hot-dip coated steel sheets by mechanical clinching. *International Journal of Material Forming*, *2*, 291-294.

[5] He, X. (2017). Clinching for sheet materials. *Science and Technology of advanced Materials*, *18*(1), 381-405.

[6] Reddy, A. C. (2020). Review on different hardening models for computation of deep drawing process simulation.

[7] Pouyafar, V., Bolandi, H., & Meshkabadi, R. (2021). Tube drawing analysis using upper bound and energy methods and validation by Cockcroft-Latham Failure Criteria. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *44*(9). https://doi.org/10.1007/s40430-021-03302-z

[8] Roy, R. K. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of manufacturing engineers.

[9] Oudjene, M., & Ben-Ayed, L. (2008). On the parametrical study of clinch joining of metallic sheets using the Taguchi method. *Engineering Structures*, *30*(6), 1782-1788.

[10] Schumann, P., Martin, D. M., Kubik, C., Schneider, T., & Groche, P. (2022). Analysis and evaluation of the clamping force on the tool surface during the blanking process. In NUMISHEET 2022: Proceedings of the 12th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (pp. 655-670). Cham: Springer International Publishing.

[11] Kubik, C., Martin, D. M., Eberz, F., & Groche, P. (2023). Simulation-Based Data Augmentation for an Inline Wear State Detection During Blanking. In International Conference on the Technology of Plasticity (pp. 23-35). Cham: Springer Nature Switzerland.

[12]Url-1 <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/gsa/default.htm?startat=ch11.html>, alındığı tarih 10.04.2024

[13] Balawender, T. (2016). Low fatigue strength of clinch joints. Journal of Mechanics Engineering and Automation, 6(2).

[14] Steinfelder, C., Acksteiner, J., Guilleaume, C., & Brosius, A. (2022). Analysis of the interactions between joint and component properties during clinching. Production Engineering, 16(2), 235-245.

HAVALİMANI YER HİZMETLERİ BİRİMLERİNDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ KAPSAMINDAKİ TEHLİKE VE RİSKLER; GÖKÇEADA HAVALİMANI ÖRNEĞİ

EMRE KESGÜN
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği
emrekesgunn@gmail.com, ORCID: 0009-0006-4773-2796

Prof. Dr. SARP KORKUT SÜMER
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği
sarpksumer@comu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7679-6154

Özet

Havacılık sektörü, dinamik yapısı ve karmaşık operasyonlarının beraberinde ciddi iş sağlığı ve güvenliği risklerini barındırmaktadır. Bu çalışma havalimanlarının ayrılmaz bir parçası olan iş sağlığı ve güvenliğinin kritik önemini Gökçeada Havalimanı özelindeki detaylı bir uygulama ile ele almaktadır. Çalışmada havalimanı yer hizmetleri birimlerinde karşılaşılan fiziksel, kimyasal, biyolojik, ergonomik ve psikolojik risk etmenleri belirlenmiş ve çalışanların sağlık ve güvenliğini en üst seviyeye çıkaracak önleyici tedbirler geliştirilmiştir. Gökçeada Havalimanı'nın apron, elektrik, makine, ARFF, hava trafik kontrol, ofis ve terminal elektronik birimlerinin çalışma ortamları detaylıca incelenerek, bu birimlerde çalışan personelin maruz kaldığı tehlikeler ve riskleri çalışma ortam ve koşulları göz önünde bulundurularak sınıflandırılmıştır. Elde edilen bulgular, havalimanları gibi yüksek risk profiline sahip iş ortamlarında proaktif İSG stratejilerinin uygulanmasının hayati bir zorunluluk olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Gökçeada Havalimanı, Risk Değerlendirmesi, Tehlike Analizi, Havacılık

HAZARDS AND RISKS WITHIN THE SCOPE OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY IN AIRPORT GROUND SERVICES: THE CASE OF GÖKÇEADA AIRPORT

Abstract

The aviation industry with its dynamic structure and complex operations, harbors significant occupational health and safety risks. This study addresses the critical importance of occupational health and safety, an integral part of airports, through a detailed application specific to Gökçeada Airport. In the study, physical, chemical, biological, ergonomic, and psychological risk factors encountered in the airport's ground handling units were identified, and preventive measures to maximize employee health and safety were developed. The working environments of Gökçeada Airport's apron, electrical, mechanical, ARFF (Aircraft Rescue and Firefighting), air traffic control, office, and terminal electronics units were examined in detail, and the hazards and risks exposed to the personnel in these units were classified by considering the work environments and conditions. The findings demonstrated that implementing proactive OHS strategies is a vital necessity in work environments with high-risk profiles such as airports.

Keywords: Gökçeada Airports, Risk Assesment, Hazard Analysis, Aviation

1. GİRİŞ

Ülkemizde birçok sektörde olduğu gibi havacılık sektöründe de iş sağlığı güvenliği konusu büyük önem arz etmektedir. Havalimanlarında son yıllarda artan uçuş ve yolcu trafiği hem çalışanlar hem de yolcular açısından çeşitli risklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Havalimanı çalışanları yaptıkları iş gereği farklı alanlarda görev almakta ve bu görevler sırasında fiziksel, kimyasal, biyolojik, ergonomik ve psikolojik risk etmenleriyle karşılaşmaktadırlar. Dolayısıyla havalimanlarında iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının etkin bir şekilde yürütülmesi hem çalışanların korunması hem de havalimanı hizmetlerinin kesintisiz ve güvenli bir şekilde sürdürülmesi açısından kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Havalimanlarının karmaşık yapısı ve çalışma alanlarından kaynaklanacak iş kazaları birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve çeşitli çalışmalar yürütmüşlerdir. Barut ve Erdoğan (2024), havalimanlarında yer hizmetleri veren çalışanların karşılaştıkları tehlike ve riskleri belirlemiş ve çözüm önerileri vermişlerdir. Erdoğan ve Çakmak (2024), Kars Harakani Havalimanı yer hizmetlerini gözlemlemiş ve elde edilen bulguları Fine-Kinney risk analizi metodu ile değerlendirmişlerdir. Çayır (2023), havaalanlarında meydana gelen hata ve risk türlerini belirleyerek önleyici bakım planlama faaliyetlerinin geliştirilmesi amaçlayan bir çalışma yürütmüştür. Kurnaz ve Sunar (2015), ulusal ve uluslararası literatürü, risk ve risk yönetimine ilişkin kavramlar ile havacılıkta risk yönetimi açısından incelemiş ve Türk Sivil Havacılık Sistemi üzerine değerlendirmelerde bulunmuşlardır.

Görüldüğü gibi havacılık sektöründe çalışanların karşılaşabileceği birçok risk etmeni bulunduğu literatürde yer almaktadır. Çeşitli araştırmacılar tarafından yürütülen çalışmalarda havalimanı çalışanlarının karşılaşabileceği risk etmenleri özellikle ele alınmıştır. Ancak 6331 sayılı İş Güvenliği Kanunu gereğince yapılacak risk değerlendirmesi çalışmalarına genel kaynak oluşturabilecek tüm çalışanları kapsayan bir çalışmanın eksik olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada Gökçeada Havalimanı örneğinde ülkemizde bulunan havalimanlarında karşılaşılabilecek risk ve tehlikelerin belirlenmesi ve alınabilecek önlemlerin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Havalimanı çalışanlarının çalışma ortam ve koşullarına göre karşılaştıkları tehlike ve riskler sınıflandırılıp bölüm çalışanlarının maruz kalabileceği durumlar ifade edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

Çalışmada öncelikle havalimanı çalışma bölümleri hava tarafı ve kara tarafı olmak üzere 2'ye ayrılmış ve Şekil 1'de verilmiştir. Çalışma bölümleri ayrı ayrı ve bütün olarak incelenmiş ve gerek genel gerekse de her çalışma bölümüne özel tespitler elde edilmiştir. Ayrıca söz konusu havalimanı için hazırlanmış risk analizi ve acil durum eylem planı da materyal olarak kullanılmıştır.

Söz konusu havalimanındaki tüm çalışma alanları incelenmiş, edinilen bu bilgiler ışığında hazırlanan dokümanlar ve ilgili mevzuatlar incelenerek iş güvenliğini tehdit eden etkenler ve çözüm önerileri ortaya konmuştur.

Hava Tarafı Çalışma Birimleri	Kara Tarafı Çalışma Birimleri
Apron Birimi Çalışanları (A)	Ofis Birimi Çalışanları (F)
Elektrik Birimi Çalışanları (B)	Elektrik Birimi Çalışanları (B)
Makine Birimi Çalışanları (C)	Makine Birimi Çalışanları (C)
ARFF Birimi Çalışanları (D)	Terminal Elektronik Birimi Çalışanları (G)
Hava Trafik Kontrol Birimi Çalışanları (E)	

Şekil 1. Havalimanı çalışma birimleri

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Her bir çalışma birimi için çok sayıda tehlike ve riskler belirlenmiştir. Aynı tehlikeyi ve riski içeren çalışma birimleri bulunmaktadır. Örneğin fiziksel risk etmeni olan gürültü apron birimi ve makine birimi çalışanlarında ortak risk olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada tehlike ve risklerin sunulmasında ve değerlendirilmesinde çalışma birimleri harflendirilerek tekrara düşülmemeye dikkat edilmiştir ve Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Havalimanı Çalışma Birimlerinde Tehlike ve Riskler

Tehlike	**Çalışma Birimleri**	**Risk**

Uçak yakıtı buharı ve egzoz gazları	A	Zehirlenme, bronşit ve astım benzeri meslek hastalıkları, cilt tahrişleri
Hasarlı araçlar	A, D	Yaralanma, ciddi ezilmeler veya sıkışmalar sonucu uzuv kaybı, ölüm, maddi kayıp
Pist yüzeyine dökülen veya saçılan sıvılar	A	Düşme ve kayma sonucu yaralanma veya sakatlanma
Ergonomik olmayan ekipmanlar	A, B, C, D, E, F, G	Yaralanma, Karpal Tünel sendromu benzeri meslek hastalıkları, Kas-iskelet sistemi rahatsızları
Gürültü	A, B, C, D, E, F, G	Geçici veya kalıcı işitme kaybı, stres ve iletişim zorlukları
Ağır yükler	A, C, G	Aşırı zorlama veya yükün düşmesi sonucu bel fıtığı, kas yırtılması, ezilmeler ve sakatlanma
Düzensiz çalışma saatleri	A, B, C, D, F, G	Stres, tükenmişlik, bilinçsiz hareket, işe karşı isteksizlik
Olumsuz hava koşulları	A, B, C, D	Soğuk algınlığı, güneş çarpması, hipotermi
Eğitimsiz çalışan	A, B, C, D, E, G	Yaralanma, sakatlık, uzuv kaybı, ölüm
Yüksekte çalışma	A, B, C, D, G	Düşme sonucu yaralanma, sakatlanma, ölüm
İş tatminsizliği	A, B, C, D, E, F, G	Tükenmişlik, bıkkınlık, psikolojik sorunlar
Yetersiz aydınlatma	A, C, E, F, G	Göz yorgunluğu, yaralanma, sakatlanma, ölüm
Uçak kazaları ve uçak çarpması	A	Yaralanma, darbe ve sıkışma sonucu uzuv kaybı veya ölüm
Kimyasalların cilde temas etmesi	A, C, D	Zehirlenme, meslek hastalığı, alerjik reaksiyonlar, kanserojen etkiler
Uçak yakıtı ve diğer yanıcı maddeler	A	Yangın ve patlama sonucu yaralanma veya ölüm

İSG yönlendirme levhalarının eksik olması	A, B, C, D, E, F, G	Yaralanma, elektrik çarpması, ölüm
Ortalıkta bırakılan kablolar ve korunmasız prizler	B, G	Takılma ve Düşme sonucu yaralanmalar, elektrik çarpması ve ölüm
Elektrikli aletlerin bozuk ve arızalı olması	B, C, G	Yangın sonucu ciddi yanıklar, elektrik çarpması ve ölüm
Yangın	B, C, D, G	Zehirlenmeler, can ve mal kayıpları
Standartlara uygun tesisatın olmaması	B	Topraklama eksikliği sonucu Elektrik çarpması sonucu yaralanma ve ölüm
Uygun KKD bulunmaması	B, C	Elektrik çarpması sonucu yaralanma ve ölüm
Radyasyon	G	Meslek hastalıkları
Elektrik akım kaçağı	B, C	Elektrik çarpması sonucu yaralanma ve ölüm
İş ekipmanlarının mekanik aksamı	B, C, D, E, G	Sıkışma ve kesikler sonucu yaralanma, uzuv kaybı ve ölüm
Basınçlı kaplar ve kazanlar	C	Patlama sonucu yaralanma, uzuv kaybı ve ölüm
Zehirli gazların solunması ve UV ışınlar	C, D, G	Görme bozuklukları, solumaya bağlı meslek hastalıkları, kanserojen etkiler
El aletleri kullanımı sıkışma, kesik ve kas-iskelet zorlanmaları	C, G	Sıkışma ve kesikler sonucu yaralanma ve uzuv kaybı
Uzun süre titreşime maruz kalma	C	El-kol titreşim sendromu, kas ve iskelet sistemi bozuklukları
Arızalı makineler	C, G	Sıkışma ve kesik nedeniyle Yaralanma veya uzuv kaybı, ezilme sonucu ölüm
Alevle temas	D	Ciddi yanıklar, yaralanma ve ölüm

Binaların çökme ve yıkılması	D	Enkaz altında kalma sonucu yaralanma, sakatlanma ve ölüm
Dar alanlar	D	Hareket kısıtlığı nedeniyle düşme veya kayma sonucu yaralanma ve sakatlanma, panik atak benzeri psikolojik sorunlar
Hidroforun yeterli su yokken çalıştırılması	D	Aşırı basınç nedeniyle patlama sonucu yaralanma ve ölüm
Yoğun stres	A, B, C, D, E, F, G	Strese bağlı anksiyete benzeri hastalıklar
Hidrolik sıvısının akması ve kesilen parçaların sıçraması	D	Hidrolik basınç nedeniyle Yaralanma veya uzuv kaybı, ciddi doku hasarları
Uzun vardiyalar	E, G	Tükenmişlik, bıkkınlık
Gece çalışmaları	E, G	Strese bağlı meslek hastalığı, yorgunluk ve dikkatsizlik
Hareketsizlik	E, F	Kas ağrıları, dolaşım bozuklukları
Havalandırma problemleri	E, F, G	Bunalma ve psikolojik durumlar
Çok soğuk ve çok sıcak ortam	E, F	Hastalık ve iş gücü kaybı
Ekranlı araçlar	E, F, G	Göz hastalıkları
Sürekli tekrarlayan hareketler	F	Ağrı, uyuşma ve Karpal Tünel Sendromu
Toz	F	Hastalık ve işgücü kaybı
Çalışma alanında malzemelerin dağınık olması	E, F, G	Takılma ve düşme sonucu yaralanmalar, sakatlanma
Raf ve dolapların sabitlenmemesi	F	Yaralanma ve sakatlanma
Mobbing	F	Stres ve psikolojik sorunlar
Hijyen eksikliği	F	Sağlığın bozulması, iş gücü kaybı

Sivri kısımların varlığı	F	Yaralanma ve sakatlanma

Çalışmada tüm havalimanı çalışma birimlerinin toplam 125 tehlike içerdiği tespit edilmiştir. Tespit edilen tehlikeler incelendiğinde çalışanların yaralanmalardan ölüme kadar birçok farklı risklere maruz kalabileceği görülmüştür. Tespit edilen bu tehlike ve maruz kalınan riskler her birim için ayrı ayrı incelendiğinde Tablo 1'de görüldüğü üzere Gökçeada Havalimanı apron birimi çalışanlarının karşılaşabileceği tehlike sayısı 17 olarak tespit edilmiştir. Bu tehlikeler incelendiğinde çok çeşitli fiziksel, kimyasal, ergonomik ve psiko-sosyal tehlikeleri barındırdığını ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, apron sahasında çalışanların maruz kaldığı risklerin hem iş ekipmanları hem de çevresel faktörlerle yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu durum apron faaliyetlerinin karmaşık, yüksek tempolu ve dikkat gerektiren yapısından kaynaklanmaktadır. Barut ve Erdoğan (2024) yürütmüş oldukları bir çalışmada apron birimi çalışanlarının karşılaşabileceği tehlike ve riskleri değerlendirerek başlıca tehlikeler arasında gürültü, aydınlatma, termal konfor, ergonomik olmayan ve tekrarlayan hareketlerin olduğu sonucuna varmışlardır. Bu çalışmada verilen tehlike kaynaklarına ek olarak apron birimi çalışanlarının yalnız fiziksel ve ergonomik değil aynı zamanda kimyasal ve psikolojik risk etmenlerine de maruz kalabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Elektrik birim çalışanlarına Tablo 1'de görüldüğü üzere toplam 14 farklı tehlike tanımlanmıştır. Tespit edilen tehlikeler çalışanların yüksek düzeyde elektrik kaynaklı risklerle karşı karşıya olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle elektrik çarpması, yangın, düşme, gürültü ve ergonomik rahatsızlıklar birim çalışanlarının güvenliği açısından en önemli riskler arasında yer almaktadır. Maruz kalınan bu riskler ölümle sonuçlanabilecek düzeydedir. Elektrik birimlerinde meydana gelen kazaların %42'sinin doğrudan arızalı ekipman kullanımından kaynaklandığı belirlenmiştir (Çalışkan ve Erdem, 2020). Dolayısıyla elektrik biriminde tespit edilen risklerin büyük bölümü önceden belirlenmeli ve kontrol altına alınmalıdır. Teknik önlemlerin yanı sıra davranışsal güvenlik yaklaşımının benimsenmeli, eğitim ve denetim faaliyetleriyle desteklenmelidir.

Tablo 1'de sunulan veriler havalimanı makine birim çalışanlarının karşılaştığı tespit edilen toplam 21 tehlikenin çok çeşitli fiziksel, kimyasal, ergonomik ve psikolojik riskleri barındırdığını göstermektedir. Özellikle akaryakıt ikmali, basınçlı kaplar, elektrikli aletler ve kaynak işlemleri gibi görev alanlarında yüksek düzeyde iş kazası ve meslek hastalığı potansiyeli bulunmaktadır. Şimşek ve Uslu (2023) bakım ve onarım faaliyetlerinin yürütüldüğü uçak bakım hangarlarındaki hâlihazırdaki riskler üzerine araştırma ve tespitler yapmışlardır. Bu amaçla yapılan araştırmalarda yüksekte çalışma, gürültü, titreşim, kimyasal malzeme kullanımı, haberleşme eksiklikleri ve iletişimsel sorunlar gibi temel etkenleri incelemişlerdir. Çalışanların ve teknisyenlerin iş kazalarından olabildiğinde uzak kalabilmesi için teknik ekipman kullanımını iyi bilmesi, koruyucu ekipman kullanmayı da ihmal etmemesi gerektiğini belirtmişlerdir. Tabloda yer alan tehlike kaynaklarının büyük bir kısmı, uygun KKD kullanımıyla minimize edilebilmektedir. Ancak İSG'nin hiyerarşik kontrol yaklaşımı çerçevesinde değerlendirildiğinde KKD kullanımının en son çözüm basamağı olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle mühendislik önlemleri, ekipman tasarımı ve iş organizasyonuna ilişkin düzenlemelerin öncelikli olarak ele alınması gerekmektedir.

ARFF birimi çalışanları havacılık sektörünün en kritik güvenlik unsurlarından biridir. Çalışanlar yüksek riskli ortamlarda görev yapmakta ve yangın, patlama, kimyasal maruziyet gibi tehlikelerle karşı karşıya kalmaktadır. Tablo 1'de tespiti yapılan 18 tehlike ARFF çalışanlarının maruz kaldığı risklerin çeşitliliğini ve bu risklerin hem fiziksel hem de psiko-sosyal boyutlarını ortaya koymaktadır. Yüksek ısı, alevle temas ve kimyasal gaz maruziyeti ARFF çalışanları için en öncelikli tehlikeler arasında yer almaktadır. Isıya dayanıklı KKD ve solunum koruyucu maskelerin kullanımı hayati önem taşımaktadır. Tabloda yer alan ergonomik riskler, ağır ekipman taşımaları ve el aletleriyle çalışma unsurları çalışanların fiziksel yorgunluğunu artırarak kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına yol açabilmektedir.

Tablo 1'de görüldüğü üzere hava trafik kontrol birimi çalışanlarının karşılaştığı tespit edilen 15 tehlike arasında sürekli dikkat gereksinimi, uzun vardiyalar, gece çalışmaları, hareketsizlik ve yetersiz aydınlatma

gibi faktörler bulunmaktadır. Bu unsurlar çalışanlarda stres, tükenmişlik, dikkat dağınıklığı ve meslek hastalıkları gibi risklere maruz kalınması sonucuna yol açabilmektedir. Örneğin uzun süre oturarak çalışan hava trafik kontrolörlerinde kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları ve göz yorgunluğu sık görülmektedir. Bu nedenle çalışma ortamlarının ergonomik prensiplere göre tasarlanması, uygun oturma düzenleri ve ekranlı araçların kullanımına ilişkin eğitimlerin verilmesi gerekmektedir. Etkili bir iş sağlığı ve güvenliği çalışmaları sayesinde uygun çalışma ortamı koşulları, eğitim, dinlenme süreleri ve stres yönetimi uygulamalarıyla desteklendiğinde hem çalışan sağlığı hem de uçuş güvenliği düzeyi önemli ölçüde artacaktır.

Ofis çalışanları havalimanlarında doğrudan fiziksel risklerin daha az ancak ergonomik ve psikolojik risk etmenlerinin daha fazla görüldüğü çalışma alanlarıdır. Tablo 1'de sunulan 19 tehlike bu birimde çalışanların sağlığını hem kısa hem de uzun vadede olumsuz etkileyebilecek niteliktedir. Özellikle ekranlı araçlarla çalışma ofis ortamlarında en yaygın risk kaynağıdır. Uzun süreli bilgisayar kullanımı, çalışanlarda göz yorgunluğu, bulanık görme ve göz kuruluğu gibi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Ergonomik olmayan ekipmanlar, hareketsiz çalışma ve yetersiz havalandırma en sık karşılaşılan etmenleri arasında yer almaktadır. Ergonomik düzenlemelerin yetersizliği iş kazalarına kıyasla daha yavaş ilerleyen ancak kalıcı etkiler yaratan meslek hastalıklarını beraberinde getirmektedir. Sonuç olarak ofis birimi çalışanlarının maruz kalabileceği risklerin çoğu basit ancak sürekli ihmal edilen faktörlerden kaynaklanmaktadır. Etkili bir risk yönetimi uygulanarak düzenli denetimlerle desteklenmeli, çalışanlara yönelik İSG eğitimleri verilmelidir.

Terminal elektronik birimi havalimanı faaliyetlerinin sürdürülebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu birim çalışanları elektrikli cihazlarla çalışma, teknolojik ekipmanların bakımı, X-ray sistemleriyle temas ve uzun süreli ekran kullanımı gibi faktörler nedeniyle iş sağlığı ve güvenliği açısından çeşitli tehlikelerle karşılaşmaktadırlar. Tablo 1'de görüldüğü üzere birim çalışanlarının karşılaşabileceği toplam 22 tehlike tanımlanmıştır. Çalışma bulguları, terminal elektronik birim çalışanlarının maruz kalabileceği hem fiziksel hem ergonomik hem de psikolojik risk etmenlerinin iç içe geçtiğini göstermektedir. Elektrikli çalışmalarda meydana gelebilecek elektrik çarpması ve yangın bu birim çalışanlarının maruz kalabileceği en ciddi riskler arasında yer almaktadır. Arızalı veya bakımı yapılmamış cihazlar, çalışanın doğrudan ölümcül risklerle karşı karşıya kalmasına yol açabilmektedir. Bir diğer önemli tehlike ve riskler arasında ise ergonomik olmayan çalışma koşulları ve uzun süreli ekran kullanımı nedeniyle gelişen kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları gösterilebilir. Bu durum ergonomik ekipmanların temini ve çalışanlara yönelik eğitimlerin önemini ortaya koymaktadır.

Havalimanı çalışma birimlerinde yapılan bu çalışma sonuçları havalimanlarında iş sağlığı ve güvenliği açısından birçok tehlikenin mevcut olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle elektrik kaynaklı riskler, arızalı ve bakımı yapılmamış ekipmanların neden olduğu fiziksel tehlikeler, ergonomik sorunlar ve psikolojik riskler çalışan sağlığı açısından öncelikli önem verilmesi gereken risk etmenleri olarak öne çıkmaktadır. Demirkol ve Güneş'e (2020) göre çalışmaların yoğun iş gücü ve zaman baskısı altında yürütülmesi de kaza olasılığını artıran temel etmenler arasındadır.

4. SONUÇ

Bu araştırma sonucunda havalimanı çalışanlarının fiziksel, kimyasal, ergonomik ve psikolojik risk etmenlerine maruz kaldıkları görülmüştür. Bu risk etmenlerine maruziyet sonucunda yaşanabilecek iş kazaları ise ölümle sonuçlanabilme ihtimaline sahiptir. Çalışanların risk maruziyetlerinin kabul edilebilebilir düzeye çekilmesi için birim çalışanlarının görevi gereği kullandığı alet ve ekipmanların bakımlarının düzenli yapılması, kullanmadan önce gerekli kontrollerin yapılması, ekipmanlara ait aksamlara uygun koruyucu tesis edilmesi ve gerekli İSG yönlendirme levhalarının yerleştirmesi hayati önem taşımaktadır. Gürültü, aydınlatma, titreşim ve termal konfor gibi fiziksel risk etmenlerine karşı önlemler alınarak çalışma ortam koşullarının iyileştirilmesi çalışanların iş kazası yaşama olasılığını azaltacaktır.

Yetkililerce birim çalışanlarının bulunduğu çalışma ortamları ve kullandıkları alet-ekipmanlar analiz edilerek uygun kişisel koruyucu donanım kullanımı sağlanmalıdır. Uzun süre ayakta veya uzun süre oturarak çalışmaktan kaçınılmalı ve yeterli dinleme araları verilmelidir. Çalışanlara yaptığı işe uygun eğitimlerin verilmesi sağlanmalıdır. İhmal edilen her bir risk etmeninin iş kazaları ve meslek hastalıklarının görülme sıklığını artırabileceği düşünülmelidir. Havacılık sektörü, çeşitli tehlike ve riskler ile ciddi sonuçlar içeren iş kazalarına neden olma potansiyeline sahip ve diğer ulaştırma sektörlerinden farklı olarak çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Son yıllarda havacılık sektöründe yaşanan yenilikler ve gelişmeler havayolu kullanımının önemli düzeyde artışına neden olmuştur. Havayolu kullanımının yıldan yıla artması havalimanı çalışanlarının maruz kalabileceği tehlike ve risklerin artmasına sebep olabilecektir. Dolayısıyla ilerleyen yıllarda havalimanı risk değerlendirmesi çalışmalarında rehber olarak kullanılması amacıyla bu çalışmada Gökçeada Havalimanında görev yapan 7 farklı birim çalışanlarının karşılaşabileceği toplam 125 adet tehlike tanımlanmıştır. Sonuç olarak havalimanlarında iş güvenliği uzmanları tarafından yapılacak değerlendirmelerde bu çalışma kapsamında incelenen ve tanımlanan tehlike, risk ve önlemler dikkate alınarak çalışanlar için daha güvenli koşullar sağlanabilecektir.

2013 yılında yürürlüğe giren İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu gereği tüm iş yerleri için zorunlu olan risk değerlendirme ve yönetimi uygulamaları kapsamında havacılık sektörü de bulunmaktadır. Çeşitli risk etmenlerini içeren çok sayıda tehlike barındıran havacılık sektöründe yapılacak olan risk değerlendirme ve yönetimi çalışmalarında çalışan sağlığı ve güvenliğinin kabul edilebilir düzeyde tutulması için bu araştırmada elde edilen ve sunulan veriler, iş sağlığı ve güvenliği profesyonelleri için rehber niteliği taşımaktadır.

KAYNAKLAR

Barut, S., Erdogan, F. O. (2024), Havaalanı Yer (Ramp) Hizmetleri Çalışanlarının Karşılaştıkları İş Sağlığı ve Güvenliği Risklerinin İncelenmesi, *Havacılık ve Uzay Çalışmaları Dergisi*, 4(1), 75-98.

Çalışkan, R., Erdem, A. (2020), Elektrikli Cihazlarla Çalışanlarda İş Kazası Risklerinin Değerlendirilmesi, *Mesleki Sağlık ve Güvenlik Dergisi*, 6(3), 122–136.

Çayır Ervural, B. (2023), İki Aşamalı Risk Değerlendirme Yöntemi ile Havacılık Sektöründe Uygulama, *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 35(4), 460-484.

Demirkol, A., Güneş, M. (2020), Havacılık Sektöründe Iş Sağlığı Ve Güvenliği Uygulamaları, *İş Sağlığı Dergisi*, 15(2), 45–59.

Erdoğan, C., Çakmak, İ. (2024), Kars Harakani Havalimanı Yer Hizmetlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından İncelenmesi, *Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(2), 53-58.

Kurnaz, S., Sunar, O. N. (2015), Havacılıkta Risk Yönetimi: Türk Sivil Havacılık Sistemi Açısından Bir Değerlendirme, *III. Ulusal Havacılık Teknolojisi ve Uygulamaları Kongresi*.

Şimşek, S., Uslu, H. (2023). Uçak Bakım-onarım Hangarlarında İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamaları ve Etkileri, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 50, 178-189.

BULMACA TEMELLİ ÖĞRENME ETKİNLİKLERİNİN YEDİNCİ SINIF ÖĞRENCİLERİNİN MATEMATİK MUHAKEME VE ÖZYETERLİK BECERİLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ABDULLAH ÇINAR
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İlköğretim Matematik Öğretmenliği Programı
abdullahcinar0364@gmail.com, ORCID: 0009-0004-8569-3448

Özet

Bu araştırmanın amacı, bulmaca temelli öğrenme yaklaşımının ortaokul 7. sınıf öğrencilerinin matematik dersine yönelik akıl yürütme becerileri ve matematik özyeterlik düzeyleri üzerindeki etkisini incelemektir. Çalışma, 2025-2026 eğitim-öğretim yılında Kocaeli ili Kandıra ilçesinde bulunan Tasvire Hurşit Güneş Ortaokulunda öğrenim gören 20 yedinci sınıf öğrencisi ile yürütülmüştür. Yarı deneysel desene göre tasarlanan araştırmada, 6 hafta boyunca haftada bir ders saati olmak üzere bulmaca temelli matematik etkinlikleri uygulanmıştır. Veri toplama araçları olarak Erdem(2015) tarafından geliştirilen 24 soruluk Matematik Muhakeme Testi (MMT) ile Umay (2001) tarafından geliştirilen 14 maddelik Matematik Özyeterlik Ölçeği (MÖÖ) kullanılmıştır. Her iki ölçme aracı da uygulama öncesi ön test ve uygulama sonrası son test olarak öğrencilere uygulanmıştır. Elde edilen veriler SPSS 26.0 paket programı kullanılarak analiz edilmiştir. Verilerin normal dağılım gösterip göstermediği Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk testleri ile incelenmiş, normal dağılım gösteren veriler için bağımlı gruplar t-testi uygulanmıştır. Araştırma bulgularına göre, 6 haftalık bulmaca temelli öğrenme etkinliklerinin öğrencilerin matematik muhakeme becerileri ve matematik özyeterlik düzeyleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir ($p<0.05$). Sonuç olarak, bulmaca temelli öğrenme yaklaşımının ortaokul matematik derslerinde öğrencilerin akıl yürütme ve matematik özyeterlik becerilerini geliştirmede etkili bir yöntem olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Bulmaca temelli öğrenme, matematik muhakeme, matematik özyeterliliği

AN EXAMINATION OF THE EFFECT OF PUZZLE-BASED LEARNING ACTIVITIES ON SEVENTH GRADE STUDENTS' MATHEMATICAL REASONING AND SELF-EFFICACY SKILLS

Abstract

The purpose of this study is to examine the effect of the puzzle-based learning approach on the reasoning skills and mathematics self-efficacy levels of 7th grade middle school students in mathematics. The study was conducted with 20 seventh-grade students attending Tasvire Hurşit Güneş Middle School in Kandıra district, Kocaeli province, during the 2025-2026 academic year. Designed according to a quasi-experimental design, the study involved puzzle-based math activities for one class hour per week over a period of six weeks. The 24-item Mathematics Reasoning Test (MMT) developed by Erdem (2015) and the 14-item Mathematics Self-Efficacy Scale (MÖÖ) developed by Umay (2001) were used as data collection tools. Both measurement tools were administered to the students as a pre-test before the application and a post-test after the application. The data obtained were analyzed using the SPSS 26.0 software package. The Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests were used to examine whether the data were normally distributed, and the dependent groups t-test was applied for data that were normally distributed. According to the research findings, the 6-week puzzle-based learning activities were found to have a statistically significant effect on students' mathematical reasoning skills and mathematical self-efficacy levels ($p<0.05$). In conclusion, it can be said that the puzzle-based learning approach is an effective method for developing students' reasoning and mathematical self-efficacy skills in middle school mathematics courses.

Keywords: Puzzle-based learning, mathematical reasoning, mathematical self-efficacy

1. GİRİŞ

Matematik, bireylerin günlük yaşamda karşılaştıkları problemleri çözme, mantıksal düşünme ve analitik becerilerini geliştirme açısından önemli bir rol oynamaktadır. Matematik eğitimi, salt işlemsel bilgi aktarımının ötesinde, öğrencilerin üst düzey düşünme becerilerini geliştirmeyi ve matematiği anlamlandırarak öğrenmelerini hedeflemektedir. Matematik eğitiminin temel becerilerinden birisi olan matematiksel muhakeme, öğrencilerin mevcut bilgi birikimlerinden yola çıkarak matematiksel düşünme yöntemleri ve araçlardan faydalanarak yeni matematiksel bilgilere ulaşma süreci şeklinde ifade edilebilir. Bu beceri; analiz etme, değerlendirme, sonuç çıkarma ve matematiksel kanıtlama gibi birbirine bağlı yetenekleri kapsamaktadır. Matematiksel muhakeme sayesinde öğrenciler, matematik problemlerinin çözümü konusunda daha derin düşünme süreçlerine girebilmekte ve mantığa dayalı çıkarsamalarda bulunabilmektedir (Umay, 2003).

Yapılan araştırmalar, matematiksel muhakeme becerilerinin öğrencilerin matematik başarısını doğrudan etkilediğini ve bu becerilerin erken yaşlardan itibaren geliştirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Özellikle ortaokul döneminde öğrencilerin soyut düşünme becerilerinin gelişmeye başlaması, bu dönemin muhakeme becerilerinin kazandırılması için kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir (Erdem, 2015). Bal-İncebacak ve Ersoy (2016), 7. sınıf öğrencilerinin matematiksel muhakeme becerilerini TIMSS'e göre analiz ettikleri çalışmalarında, öğrencilerin muhakeme becerilerinin geliştirilmesine yönelik etkinliklere ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

Matematik eğitiminde bir diğer önemli kavram ise matematik özyeterlik algısıdır. Bandura'nın (1977) öz-yeterlik kuramına dayanan matematik özyeterlik, öğrencilerin matematik dersindeki görevleri başarıyla tamamlayabileceklerine dair inançlarını ifade etmektedir. Umay (2001), matematik özyeterlik algısının öğrencilerin matematik başarısını ve matematiğe yönelik tutumlarını önemli ölçüde etkilediğini vurgulamaktadır. Yapılan araştırmalar, matematik özyeterlik düzeyi yüksek olan öğrencilerin matematik problemlerini çözmede daha istekli ve kararlı olduklarını, zorluklarla karşılaştıklarında pes etmeden alternatif çözüm yolları aradıklarını göstermektedir (Abalı Öztürk ve Şahin, 2015; Ural, Umay ve Argün, 2008). Özellikle ortaokul döneminde öğrencilerin matematik özyeterlik algılarının desteklenmesi, ilerleyen eğitim kademelerinde matematik başarılarının artmasına katkı sağlamaktadır. Ancak geleneksel öğretim yöntemlerinin öğrencilerin matematik muhakeme becerilerini ve özyeterlik algılarını geliştirmede yetersiz kaldığı birçok araştırmada ortaya konulmuştur (Sozbilir, Guler ve Ciltas, (2012). Kavramsal bilgiden yoksun işlemsel bilgilere dayanan, öğretmen merkezli ve ezber odaklı öğretim yaklaşımları, öğrencilerin matematiği anlamlandırmalarını ve matematiksel düşünme becerilerini geliştirmelerini engellemektedir. Nitekim matematik okuryazarlığı bağlamında, araştırma ve inceleme içermeyen, uygulama alanı bulunmayan ezber bilgilere dayalı anlayışın eğitimde artık geçerli olamayacağı vurgulanmaktadır (Olkun ve Toluk, 2005). Milli Eğitim Bakanlığı (2024) tarafından hazırlanan Türkiye Yüzyılı Maarif Modeli öğretim programlarında da işlemsel yükü fazla olan ve anlamlı öğrenmelere hizmet etmeyen içerik yapısından çıkılarak, öğrenci merkezli, beceri temelli bir program anlayışına geçilmesi hedeflenmiştir. Bu durum, matematik eğitiminde alternatif öğrenme yaklaşımlarına olan ihtiyacı artırmaktadır. Yapılandırmacı yaklaşımın benimsenmesiyle birlikte öğrenci merkezli, aktif öğrenmeyi destekleyen, problem çözme ve keşfetmeye dayalı öğretim yöntemlerinin matematik eğitiminde kullanılması önerilmektedir (Baki, 2008; Altun, 2008).

Matematik öğretiminde kullanılan alternatif yöntemlerden biri olan bulmaca temelli öğrenme, problem çözme becerilerinin geliştirilmesine odaklanan modern bir pedagojik yaklaşımdır. Eleştirel ve analitik düşünme kapasitesinin geliştirilmesinde etkili bir araç olan bu model, öğrencileri gerçek yaşamda karşılaşabilecekleri karmaşık durumlarla başa çıkabilecek şekilde donatmayı amaçlar. Uluslararası alanda, özellikle Avustralya, Amerika ve Katar'daki üniversitelerde uygulanan bulmaca temelli öğrenme kurslarının etkili olduğu bildirilmiştir (Falkner, Sooriamurthi ve Michalewicz, 2010; Merrick, 2010). Matematik içerikli

bulmacalar, öğrencilerin geometrik ve uzamsal problemleri keşfetme sürecini desteklerken, soyut düşünme becerilerinin gelişmesine de katkı sağlar. Bu beceri, özgün öğrenme ve araştırma yeteneğinin temel yapı taşlarından birini oluşturmaktadır. Bulmaca etkinliklerinde öğrenciler, çözüm için dayanıklılık ve kararlılık isteyen problemlerle karşılaşır; bu süreç matematiksel akıl yürütme açısından değerli ve gerçekçi deneyimler sunar.

Türkiye'de matematik eğitimi alanında son yıllarda yapılan araştırmalar, öğrenci merkezli ve aktif öğrenmeyi destekleyen yöntemlerin öğrenci başarısını ve duyuşsal özelliklerini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Ancak özellikle ortaokul düzeyinde bulmaca temelli öğrenme yaklaşımının matematik muhakeme becerileri ve özyeterlik üzerindeki etkisini inceleyen sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu araştırma, bulmaca temelli öğrenme etkinliklerinin 7. sınıf öğrencilerinin matematik muhakeme becerileri ve matematik özyeterlik düzeyleri üzerindeki etkisini inceleyerek bu alandaki boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Araştırmanın sonuçları, matematik öğretmenlerine alternatif bir öğretim yaklaşımı sunması ve öğrencilerin matematik başarılarının artırılmasına katkı sağlaması açısından önem taşımaktadır.

2.YÖNTEM

2.1. Araştırmanın Modeli

Bu araştırmada, bulmaca temelli öğrenme etkinliklerinin 7. sınıf öğrencilerinin matematik muhakeme becerileri ve matematik özyeterlik düzeyleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla nicel araştırma desenlerinden yarı deneysel desen kullanılmıştır. Yarı deneysel desen, bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisinin incelendiği ancak katılımcıların rastgele atanmadığı deneysel araştırma modelidir (Creswell, 2017). Bu araştırmada tek grup ön test-son test modeli kullanılmıştır.

2.2. Çalışma Grubu

Araştırmanın çalışma grubunu, 2025-2026 eğitim-öğretim yılı güz döneminde Kocaeli ili Kandıra ilçesinde bulunan Tasvire Hurşit Güneş Ortaokulunda öğrenim gören 20 yedinci sınıf öğrencisi oluşturmaktadır. Örneklem seçiminde uygun örnekleme tekniği kullanılmıştır. Bu teknik, mevcut kaynakların (zaman, finansal imkânlar ve işgücü) sınırlı olması durumunda, araştırmacının kolaylıkla erişebildiği ve uygulama yapabileceği katılımcılardan örneklem oluşturulmasını ifade etmektedir (Büyüköztürk vd., 2020). Çalışma grubunun belirlenmesinde gönüllülük esası dikkate alınmış, araştırmaya katılım için velilerden yazılı izin alınmıştır. Katılımcıların 10'u (%50) kız, 10'u (%50) erkek öğrencilerden oluşmuştur.

2.3.Veri Toplama Araçları

2.3.1. Matematik Muhakeme Testi (MMT)

Araştırmada öğrencilerin matematik muhakeme becerilerini ölçmek amacıyla Erdem (2015) tarafından geliştirilen Matematik Muhakeme Testi (MMT) kullanılmıştır. Test, ortaokul öğrencilerinin matematiksel muhakeme becerilerini ölçmeye yönelik olarak hazırlanmış olup 24 çoktan seçmeli sorudan oluşmaktadır. Araştırmada öğrencilerin beceri düzeylerinin belirlenmesinde beşli derecelendirme ölçütü benimsenmiştir. Buna göre; 0.00-0.99 arası puan ortalaması oldukça düşük düzeyi, 1.00-1.99 arası düşük düzeyi, 2.00-2.99 arası orta düzeyi, 3.00-3.99 arası yüksek düzeyi ve 4.00-5.00 arası puan ortalaması oldukça yüksek beceri düzeyini ifade etmektedir. Erdem (2015) tarafından yapılan güvenirlik analizinde testin güvenirlik katsayısı 0.89 olarak bulunmuştur. Bu araştırmada testin güvenirlik katsayısı ön test için 0.85, son test için 0.92 olarak hesaplanmıştır.

2.3.2. Matematik Özyeterlik Ölçeği (MÖÖ)

Bu çalışmada öğrencilerin matematik özyeterlik inançlarını ölçmek için Umay (2001) tarafından geliştirilen ölçme aracı tercih edilmiştir. 14 maddelik Matematik Özyeterlik Ölçeği, "Hiçbir zaman" (1) ile "Her zaman" (5) arasında değişen beşli derecelendirme sistemine göre yanıtlanmaktadır. Ölçekte 3,6,7,10,11 ve 12. maddeler olumsuz olup, analiz yapılmadan önce olumluya çevrilmiştir, toplam puanlar 14-70 aralığında

değer almaktadır. Artan puanlar, matematik özyeterliğin arttığını göstermektedir. Orijinal çalışmada ölçeğin iç tutarlılığı Cronbach Alpha ile hesaplanmış ve .88 olarak belirlenmiştir (Umay, 2001). Bu araştırmada ise güvenirlik katsayısı ön testte .83, son testte .87 olarak bulunmuştur.

2.3.3. Verilerin Toplanması

Araştırmada kullanılan veri toplama araçları (Matematik Muhakeme Testi ve Matematik Özyeterlik Ölçeği), bulmaca temelli öğrenme etkinliklerine başlamadan önce ön test olarak, 6 haftalık uygulama süreci tamamlandıktan hemen sonra ise son test olarak uygulanmıştır. Veri toplama araçları araştırmacı tarafından sınıf ortamında uygulanmış, öğrencilere ölçme araçlarını doldurmaları için yeterli süre tanınmıştır.

2.3.4. Verilerin Analizi

Araştırma verilerinin çözümlenmesi SPSS 26.0 istatistik yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecine geçilmeden önce, veri setinin normal dağılım özelliği gösterip göstermediği kontrol edilmiştir. Bu amaçla Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk normallik testleri uygulanmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk Normallik Testi Sonuçları

	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	İstatistik	df	p	İstatistik	df	p
Öntest MMT	,129	20	,200*	,945	20	,294
Sontest MMT	,153	20	,200*	,961	20	,557
Öntest MÖÖ	,148	20	,200*	,931	20	,164
Sontest MÖÖ	,129	20	,200*	,957	20	,493

*. Bu değer, gerçek anlamlılık düzeyinin alt sınırıdır.

a. Lilliefors Anlamlılık Düzeltmesi

Tablo 2'de görüldüğü üzere her iki ölçme aracına ait tüm ön test ve son test verilerinde $p > .05$ bulunması, verilerin normal dağılım gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle ön test ve son test puanlarının karşılaştırılmasında parametrik testlerden bağımlı gruplar t-testi tercih edilmiştir. Bu test, aynı örneklem üzerinde yapılan iki ölçümün ortalamalarının karşılaştırılmasında kullanılır (Büyüköztürk, 2020).

3. BULGULAR

Tablo 3'te öğrencilerin Matematik Özyeterlik Ölçeği'nden aldıkları ön test ve son test puanları bağımlı gruplar t-testi ile incelenmiştir.

Tablo 3. 7. sınıf öğrencilerinin Öntest-Sontest Matematik Özyeterlik Puanlarının Karşılaştırılması

	N	Ortalama	Standart Sapma	t	p
Öntest MÖÖ	20	41,10	5,015	-8,402	,000
Sontest MÖÖ	20	52,75	4,778		

Tablo 3 incelendiğinde, öğrencilerin bulmaca temelli öğrenme etkinlikleri öncesinde Matematik Özyeterlik Ölçeği'nden aldıkları puan ortalaması 41.10 (SS=5.02) iken, uygulama sonrasında bu ortalamanın 52.75'e (SS=4.78) yükseldiği görülmektedir. Yapılan bağımlı gruplar t-testi sonucunda, ön test ve son test puanları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur ($t_{(19)}$=-8.402, $p<.05$). Bu bulgu, 6 haftalık bulmaca temelli öğrenme etkinliklerinin öğrencilerin matematik özyeterlik düzeylerini anlamlı düzeyde artırdığını göstermektedir.

Tablo 4'de öğrencilerin Matematik Muhakeme Testi'nden aldıkları ön test ve son test puanları bağımlı gruplar t-testi ile incelenmiştir.

Tablo 4. 7. Sınıf Öğrencilerinin Öntest-Sontest Matematik Muhakeme Beceri Puanlarının Karşılaştırılması

	N	Ortalama	Standart Sapma	t	p
Öntest MMT	20	1,25	,756	-6,035	000
Sontest MMT	20	2,11	1,14		

Tablo 4 incelendiğinde, öğrencilerin bulmaca temelli öğrenme etkinlikleri öncesinde Matematik Muhakeme Testi'nden aldıkları puan ortalaması 1.25 (SS=0.76) iken, uygulama sonrasında bu ortalamanın 2.11'e (SS=1.14) yükseldiği görülmektedir. Yapılan bağımlı gruplar t-testi sonucunda, ön test ve son test puanları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur ($t_{(19)}$=-6.035, p<.05). Bu bulgu, 6 haftalık bulmaca temelli öğrenme etkinliklerinin öğrencilerin matematik muhakeme becerilerini anlamlı düzeyde geliştirdiğini göstermektedir.

4.SONUÇ

Bu araştırmanın temel amacı, bulmaca temelli öğrenme etkinliklerinin 7. sınıf öğrencilerinin matematik özyeterlik düzeyleri ve matematik muhakeme becerileri üzerindeki etkisini incelemektir. Araştırma sonuçları, 6 haftalık bulmaca temelli öğrenme uygulamasının her iki değişken üzerinde de istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Matematik özyeterlik düzeyi açısından, öğrencilerin ön test puan ortalaması 41.10 iken son test puan ortalaması 52.75'e yükselmiş ve bu artış istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (p<.05). Bu sonuç, bulmaca temelli öğrenme etkinliklerinin öğrencilerin matematiğe yönelik kendilerine olan güvenlerini ve matematik görevlerini başarıyla tamamlayabileceklerine ilişkin inançlarını önemli ölçüde güçlendirdiğini göstermektedir.

Matematik muhakeme becerileri açısından, öğrencilerin ön test puan ortalaması 1.25 iken son test puan ortalaması 2.11'e yükselmiş ve bu artış istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (p<.05). Bu sonuç, bulmaca temelli öğrenme etkinliklerinin öğrencilerin matematiksel düşünme, problem çözme, genelleme yapma, örüntü tanıma ve mantıksal akıl yürütme becerilerini önemli ölçüde geliştirdiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu araştırma bulmaca temelli öğrenmenin ortaokul matematik eğitiminde etkili bir alternatif öğretim yaklaşımı olduğunu göstermiştir. Bu yaklaşım, öğrencilerin hem duyuşsal hem de bilişsel gelişimlerini destekleyerek matematik eğitiminde bütünleşik bir perspektif sunmaktadır. Geleneksel öğretim yöntemlerinin yerine veya bunları tamamlayıcı olarak bulmaca temelli öğrenme etkinliklerinin kullanılması, öğrencilerin matematik derslerine karşı olumlu tutum geliştirmelerine ve matematiksel düşünme becerilerini güçlendirmelerine katkı sağlayabilir.

5. TARTIŞMA

Bu araştırmada, bulmaca temelli öğrenme etkinliklerinin 7. sınıf öğrencilerinin matematik özyeterlik düzeyleri ve matematik muhakeme becerileri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araştırma bulguları, 6 haftalık bulmaca temelli öğrenme uygulamasının hem matematik özyeterlik hem de matematik muhakeme becerileri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ve büyük etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Araştırma bulguları, bulmaca temelli öğrenme etkinliklerinin öğrencilerin matematik özyeterlik düzeylerini anlamlı derecede artırdığını göstermektedir (t=-8.402, p<.05). Bu bulgu, matematik özyeterlik müdahalelerinin etkilerini sistematik olarak inceleyen Zakariya (2022) tarafından yürütülen kapsamlı derleme çalışmasının bulgularıyla tutarlılık göstermektedir. Zakariya (2022), özellikle ortaokul düzeyinde uygulanan etkili müdahalelerin öğrencilerin matematik özyeterlik inançlarını güçlendirdiğini ve bunun

matematik başarısı üzerinde olumlu etkiler yarattığını rapor etmiştir. Abalı Öztürk ve Şahin (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise alternatif ölçme-değerlendirme yöntemlerinin öğrencilerin özyeterlik algıları üzerinde olumlu etkileri olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, bu araştırmada da alternatif bir öğretim yöntemi olan bulmaca temelli öğrenme, geleneksel yöntemlerin sınırlılıklarını aşarak öğrencilerin matematik özyeterlik düzeylerini anlamlı şekilde artırmıştır. Ural, Umay ve Argün (2008) tarafından vurgulanan, özyeterlik inancının matematik başarısındaki rolü göz önüne alındığında, bu araştırmada elde edilen bulgular önem kazanmaktadır. Öğrencilerin matematik özyeterlik düzeylerindeki bu artış, gelecekteki matematik performanslarını olumlu yönde etkileyebilecek bir temel oluşturmaktadır.

Araştırma bulguları, bulmaca temelli öğrenme etkinliklerinin öğrencilerin matematik muhakeme becerilerini anlamlı derecede geliştirdiğini göstermektedir ($t=-6.035$, $p<.05$). Bu bulgu, uluslararası literatürde bulmaca temelli öğrenme yaklaşımının problem çözme ve eleştirel düşünme becerilerini geliştirdiğini gösteren çalışmalarla (Falkner, Sooriamurthi ve Michalewicz, 2010; Michalewicz, Falkner, Sooriamurthi, 2011) tutarlılık göstermektedir. Bal-İncebacak ve Ersoy (2016) tarafından yürütülen çalışmada, matematiksel muhakeme becerilerinin geliştirilmesinde öğrenci merkezli, aktif öğrenme yaklaşımlarının önemi vurgulanmıştır. Bu araştırmanın bulguları, bu vurguyu destekler nitelikte olup, bulmaca temelli öğrenmenin öğrenci merkezli ve aktif bir öğrenme ortamı sağlayarak muhakeme becerilerini geliştirdiğini göstermektedir. Erdem (2015) tarafından geliştirilen Matematik Muhakeme Testi'nin kullanıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Türk öğrencilerinin muhakeme becerilerinin geliştirilmesinde alternatif öğretim yaklaşımlarının etkililiğine dair önemli kanıtlar sunmaktadır.

Araştırmadan elde edilen bulgular bütünsel olarak değerlendirildiğinde, bulmaca temelli öğrenme etkinliklerinin ortaokul matematik eğitiminde etkili bir alternatif öğretim yaklaşımı olduğu görülmektedir.. Bu bulgular, matematik eğitiminde öğrenci merkezli, aktif öğrenme yaklaşımlarının önemini vurgulayan Milli Eğitim Bakanlığı'nın (2024) Türkiye Yüzyılı Maarif Modeli'nin perspektifiyle de örtüşmektedir.

KAYNAKLAR

ABALI ÖZTÜRK, Y. ve ŞAHİN, Ç. (2015), Matematiğe ilişkin akademik başarı, özyeterlik ve tutum arasındaki ilişkilerin belirlenmesi, *The Journal of Academic Social Science Studies*, 31, 343-366.

ALTUN, M. (2008), *İlköğretim İkinci Kademede (6, 7 ve 8. Sınıflarda) Matematik Öğretimi*, Bursa: Aktüel Alfa Akademi.

BAKİ, A. (2008), *Kuramdan Uygulamaya Matematik Eğitimi*, Ankara: Harf Eğitim Yayıncılığı.

BAL-İNCEBACK, B. ve ERSOY, E. (2016), 7. sınıf öğrencilerinin matematiksel muhakeme becerilerinin TIMMS'e göre analizi, *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 9(46), 474-481.

BANDURA, A. (1977), Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change, *Psychological Review*, 84(2), 191-215.

BÜYÜKÖZTÜRK, Ş., KILIÇ ÇAKMAK, E., AKGÜN, Ö. E., KARADENİZ, Ş., ve DEMİREL, F. (2020), *Eğitimde Bilimsel Araştırma Yöntemleri*, Ankara: Pegem Akademi.

ERDEM, E. (2015), *Zenginleştirilmiş Öğrenme Ortamının Matematiksel Muhakemeye ve Tutuma Etkisi* (Yayımlanmamış doktora tezi), Atatürk Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

FALKNER, N., SOORIAMURTHI, R. ve MICHALEWICZ, Z. (2010), Puzzle-based learning for engineering and computer science, *IEEE Computer*, 43(4), 20-28.

MEB (2024), *Türkiye Yüzyılı Maarif Modeli Matematik Dersi Öğretim Programı*, Ankara: Talim ve Terbiye Kurulu Başkanlığı.

MERRICK, K. E. (2010), An empirical evaluation of puzzle-based learning as an interest approach for teaching introductory computer science, *IEEE Transactions on Education*, 53(4), 677-680.

MICHALEWICZ, Z., FALKNER, N., ve SOORIAMURTHI, R. (2011), Puzzle-based learning: An introduction to critical thinking and problem solving, *Decision Line*, 42(5), 6-9.

OLKUN, S. ve TOLUK, Z. (2004), İlköğretimde matematik öğretimine çağdaş yaklaşımlar, Güncel Gelişmeler Işığında İlköğretim: Matematik, Fen, Teknoloji, Yönetim içinde (s. 1-37), Ankara: Anı Yayıncılık.

SOZBILIR, M., GULER, G., ve CILTAS, A. (2012), Türkiye'de matematik eğitimi araştırmaları: Bir içerik analizi çalışması, *Kuram ve Uygulamada Eğitim Bilimleri*, 12, 565-580.

UMAY, A. (2001), İlköğretim matematik öğretmenliği programının matematiğe karşı özyeterlik algısına etkisi, *Journal of Qafqaz University*, 8(1), 1-8.

UMAY, A. (2003), Matematiksel muhakeme yeteneği, *Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 24, 234-243.

URAL, A., UMAY, A. ve ARGÜN, Z. (2008), Öğrenci takımları başarı bölümleri tekniği temelli eğitimin matematikte akademik başarı ve öz yeterliğe etkisi, *Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 35, 307-318.

ZAKARIYA, Y. F. (2022), Improving students' mathematics self-efficacy: A systematic review of intervention studies, *Frontiers in Psychology*, 13, 986622.

KOCAELİ'NDE ENDÜSTRİYEL GÜRÜLTÜ VE ŞEHRE ETKİSİ

Dr. Öğr. Gör. Ali İhsan ENGÜR
Kocaeli Üniversitesi, Gölcük MYO, Makine
ali.engur@kocaeli.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0124-5491

Özet

Kocaeli, Türkiye'nin en güçlü sanayi tesislerinin olduğu şehrin büyümesiyle sanayi tesislerinin şehrin içerisinde kaldığı ve Türkiye'nin sanayi başkenti olarak nitelendirilen bir şehirdir. İlde ki sanayi kuruluşlarına baktığımızda Türkiye'nin en büyük sanayi kuruluşu olarak kabul edilen Tüpraş, Lastik sektörünün devleri Bridgestone, Lassa, Pirelli Goodyear, yine Sabancı grubu ile hayata başlayan Enerjisa, Kordsa otomotiv sektöründe Ford, Hyundai ve bu endüstri kuruluşlarının yanında Çolakoğlu metalürji, Şişe Cam, Aygaz, Sarkuysan, Yıldız Entegre, Hayat Kimya, Assan Alüminyum, İpragaz, İgsaş, Nuh Çimento, DYO, Polisan, İzocam gibi büyük ölçekte fabrikalar içerisinde barındırdığından ülkenin yoğun sanayi kentlerinden biri olup çevresel gürültü özellikle liman, lojistik ve OSB bölgelerinde yüksek seviyelerdedir. Bu çalışmada Endüstriyel Gürültü şehrin yaşamına sadece fabrika lokasyonlu olarak değil bu fabrikaların lojistik ağı dolayısı ile oluşturduğu gürültü de dikkate alınarak incelenecektir.

Anahtar Sözcükler: Endüstriyel Gürültü, Sanayi Kenti Kocaeli, Lojistik Gürültü, Organize Sanayi Bölgeleri

INDUSTRIAL NOISE IN KOCAELI AND ITS IMPACT ON THE CITY

Abstract

Kocaeli is a city where the industrial facilities remain in the city with the growth of the city where Turkey's strongest industrial facilities are located and is described as the industrial capital of Turkey. When we look at the industrial enterprises in the province, we see that Tüpraş, which is considered the largest industrial enterprise in Turkey, Bridgestone, Lassa, Pirelli Goodyear, the giants of the tire industry, Enerjisa, which started life with the Sabancı group, Kordsa, Ford and Hyundai in the automotive sector, as well as Çolakoğlu metallurgy, Şişe Cam, Aygaz, Sarkuysan, Yıldız Entegre, Hayat Kimya, Assan Aluminum, İpragaz, İgsaş, Nuh Çimento, DYO, Polisan, It is one of the busiest industrial cities of the country as it contains large-scale factories such as Izocam, and environmental noise is at high levels, especially in port, logistics and OIZ regions. In this study, Industrial Noise will be examined not only in terms of factory location, but also by taking into account the noise created by these factories due to the logistics network.

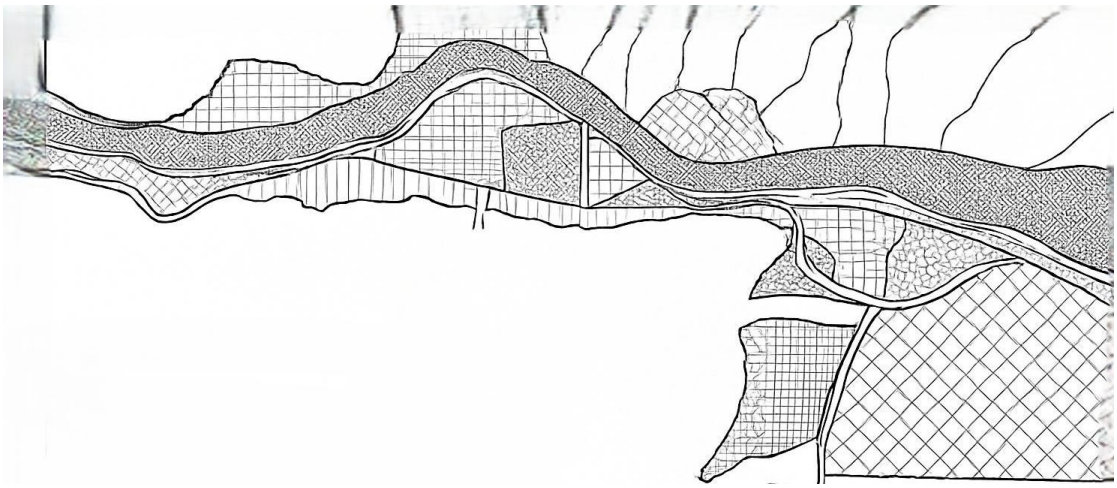
Keywords: Industrial Noise, Industrial City Kocaeli, Logistics Noise, Organized Industrial Zones

1. GİRİŞ

Kocaeli'deki otomotiv, metal, kimya bunlara bağlı olarak bu işletmelerin oluşturduğu lojistik yoğunluğu; fabrika ekipmanları, tır trafiği ve liman operasyonları nedeniyle sürekli gürültü üretilmektedir (Kocaeli Çevre Durum Raporu, 2022). Bu raporda verilen bilgilerde Endüstriyel gürültünün incelenmesi ve kontrol altında tutulması 2006'da çıkan bir kanunla Kocaeli Büyükşehir Belediyesi'ne verilmiştir. Yine Engür'ün 2004 yılında yaptığı yüksek lisans tezinde şehrin gürültü haritası çıkarılmış (Resim 1.) bu çalışma ile ilgili bölgelerin 2025 gürültü haritası (Resim 2.) karşılaştırılmıştır. Bu durumda oluşan gürültü'nün E-5 boyunca genişlediği şehrin üst bölgelerine taşındığı yine Alikahya bölgesine futbol stadyumunun gelmesi ve Hyundai fabrikasının çevresinin gelişmesi ile gürültü oranının arttığı bu bağlamda şehirde gürültü anlamında azalma olacağına tam aksi yönde bir hat boyunca gürültünün arttığı görülmüştür.



Resim 1. ENGÜR, Ali İhsan 2004 yılı Yüksek Lisans Tezi Kocaeli Gürültü Haritası



Resim 2. 2025 yılı Kocaeli Gürültü Haritası (Engür, Ali İhsan 2025)

2. GÜRÜLTÜNÜN SAĞLIK VE SOSYAL ETKİLERİ

Uzun süreli gürültüye maruz kalmak; uyku bozuklukları başta olmak üzere , hipertansiyon, stres, işitme kaybı ve yaşam kalitesinde düşüş gibi insan sağlığını tehlikeye atacak sonuçlar doğurmaktadır. Bir çok hastalığın alt kaynaklarından biri olarak stres verildiğini düşünürsek aslında bu gürültüye maruz kalmanın ne kadar tehlikeli olabileceği kafamızda daha net canlanabilir. Burada sınır değer olarak WHO (2018) yayınlanan bildirisinde, 55dB üzeri uzun vadeli maruz kalmanın özellikle kardiyovasküler riskleri artırdığını belirtilmektedir.

Tablo 1. İnsan sağlığı açısından Maruz kalınan desibel oranları ve etki ettiği süreler

Gürültü Seviyesi (dB)	Güvenli Maruz Kalma Süresi	Sağlık Etkisi

30 dB	Sınırsız	Çok hafif ortam gürültüsü, sağlık etkisi yok
40 dB	Sınırsız	Hafif rahatsızlık oluşturabilir
50 dB	Sınırsız	Konuşmayı hafif zorlaştırır
60 dB	Sınırsız	Orta düzey rahatsızlık, dikkat dağılması
70 dB	24 saat	Uzun sürede stres, kalp-damar etkileri
75 dB	8–12 saat	İşitme kaybı riski başlar
80 dB	8 saat	İşitme hasarı riski
85 dB	8 saat	İşitme kaybı riski artar
88 dB	4 saat	3 dB artış = süre yarıya iner
91 dB	2 saat	İşitme sinirlerinde hasar riski
94 dB	1 saat	Kulak çınlaması, geçici kayıp
97 dB	30 dakika	Koruyucu gereklidir
100 dB	15 dakika	Kalıcı işitme kaybı riski
105 dB	5 dakika	Çok tehlikeli
110 dB	1 dakika	Ağrı eşiğine yaklaşır
120 dB	Anında	Ağrı eşiği – anında zarar

Tablo 1. ‘da gösterilen insan sağlığı açısından oluşan desibel genlikleri incelendiğinde günlük hayatımızda 50-55 desibel üstü maruz kalmanın sağlığımızda sıkıntı oluşturabileceği 75 desibel üstünün ise artık risk taşıdığını açıkça görebilmekteyiz. Tüm fabrikalarda 75 desibel üstü çalışmalarda uzun süreli maruz kalma söz konusuysa kulak tıkacı, 95 desibel üstüne maruz kalma söz konusu ise süreye bakılmaksızın kulak tıkacı kullanmak zorunludur. Peki bu fabrikaların, limanları veya lojistik ulaşımının sağlandığı karayollarının kenarında oturan veya çalışan sivil halkın korunmasız olması sonucu oluşabilecek hastalıklar nelerdir diye çalışma yaparsak, sonuçta stres kaynaklı bir çok hastalığı listeye yazmamız gerekecektir.

3. MEVZUAT VE YÖNETİM UYGULAMALARI

Kocaeli'nde gürültü denetimleri Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği çerçevesinde yapılmaktadır. Denetimler çoğunlukla şikâyet temellidir. Yerel yönetim ve geçmiş ülke politikalarında gürültü ve önlenmesine karşılık gelen yönetmelikler bulunsa da kullanıldıkları çok görülmemektedir. Ancak bu yönetmeliklerin tatil bölgelerinde oluşan gürültünün yakınlarında yerleşim yeri varsa belirli bir saat sonrasında uygulandığını söylemek mümkün olabilir. Bu durum proaktif yönetimi sınırlamaktadır.

5. KOCAELİ'DE ÖNE ÇIKAN GÜRÜLTÜ SORUNLARI

Kocaeli'nde 20025 Kasım verilerine göre 35 adet liman bulunmaktadır. Konteynır, Ro Ro, genel kargo, sıvı ve kimyasal taşınması için kullanılan Liman operasyonları başta olmak üzere Organize Sanayi Bölgesi ve Fabrikaların–konut yakınlığı, devamlı üreten bir şehir olan Kocaeli'nde makinelerinin sürekli çalışması ve ağır vasıta trafiği şehirde gürültünün ana kaynaklarını oluşturmaktadır. Tablo 2. De Kocaeli'nde ki başlıca gürültü kaynakları ve etki düzeyleri incelenmiş iken Tablo3. De ise uzun süreli gürültüye maruz kalmanın sağlık açısından etkileri incelenmiştir.

Tablo 2. Kocaeli'nde Başlıca Gürültü Kaynakları ve Etki Düzeyleri

Gürültü Kaynağı	**Etkilenen Alan**	**Yaklaşık Etki Düzeyi**
Liman Operasyonları	Körfez – Derince – İzmit Sahili	Yüksek (Gece-Gündüz)
OSB Sanayi Tesisleri	Gebze – Çayırova – Dilovası	Orta / Yüksek
Ağır Vasıta Trafiği	D-100 ve TEM Bağlantıları	Orta
Fabrika Ekipmanları	Sanayi Yerleşimleri	Sürekli / Orta-Yüksek

Tablo 3. Uzun Süreli Gürültü'ye Maruz kalmanın Sağlık Üzerindeki Etkileri

Sağlık Etkisi	**Açıklama**
Uyku Bozuklukları	Gece gürültüsü 45 dB üzeri kesintili uykuya neden olur.
Stres ve Kaygı	Sürekli maruziyet psikolojik baskıyı artırır.
Kardiyovasküler Risk	WHO verilerine göre uzun süreli >55 dB maruziyet hipertansiyon ile ilişkilidir.
İşitme Problemleri	Endüstriyel bölgelerde çalışanlarda uzun vadeli işitme kaybı görülebilir.

6. ENDÜSTRİYEL VE ŞEHİR GÜRÜLTÜLERİNİN AZALTIM ÖNERİLERİ

• Makinelerde izolasyon ve titreşim sönümleme yöntemleri ile yerel olarak daha ilk aşamada gürültünün önemli derecede azaltılması sağlanabilir.

• Organize Sanayi Bölgeleri ile konutlar arasına arası tampon bölgeler oluşturulabilir. Özellikle yeşillendirilen ve ağaç örtüsü ile kaplanan bu bölgeler hem ses izolasyonu hem de temiz hava açısından önemlidir.

• Eğer tampon bölge oluşturulacak arazi yoksa gürültü kaynaklarına yönelik yapay gürültü bariyerleri ya da yine yer ölçümüne bağlı olarak yeşil kuşak bariyerler oluşturulabilir.

• Kocaeli'nde en büyük sorunlardan biri olan trafik akışı ne yazık ki şehrin içerisinden geçmektedir. Örneğin merkez ilçe İzmit'te trafik şehrin giriş kısmı Seka Bölgesinden Çıkış Bölgesi olan Yahya Kaptan bölgesine kadar yerin altına alınacak E-5 trafiği hem merkez bölgeyi gürültüden arındırır hem de üzerine yapılacak proje ile şehrin deniz ile buluşması sağlanabilir. Aynı projeler Gebze'den Karamürsel'e kadar uygulanabilir.

• Sürekli gürültü izleme istasyonları ile ani gürültü artışları belirlenerek çözüm yöntemleri geliştirilebilir.

7. SONUÇ

Kocaeli'nde endüstriyel gürültü yönetimi sadece teknik olarak ele alınmayıp hem de yönetimsel açıdan da incelenmesi gerekmektedir. Proaktif planlama, izleme ve sanayi-şehir uyum politikaları ile gürültü etkileri azaltılabilir. Bu politikaların bilim insanları ve yerel yönetimler tarafından birlikte incelenip yön haritası oluşturulması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

Kocaeli Çevre Durum Raporu (2022)
Engür A.İ. (2004) Endüstriyel Gürültü ve Kontrolü (Yüksek lisans Tezi)
World Health Organization. (2018). Environmental Noise Guidelines for the European Region.
Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği (2022)
Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Gürültü Denetim Raporları (2023)

CHATGPT'NİN İŞLETMELERE ETKİSİ ve KURUM PERFORMANSINA KATKILARI

YASEMİN DERETAM
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
yaseminderetam@gmail.com

Dr. Öğr. Üyesi PINAR YILDIZ KUMRU
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
pinarki@kocaeli.edu.tr

Özet

Yapay zeka destekli sistemler, firmaların performansını üst seviyelere taşıma potansiyeline sahiptir. Bu tür teknolojiler, çalışma süreçlerinde hız ve etkinlik sağlayarak iş akışlarını daha etkili hale getirir. Örneğin, ChatGPT gibi yapay zeka çözümleri, çalışanların sıkıcı ve zaman alan görevlerini azaltarak, onların daha yaratıcı ve stratejik işlere yönelmelerini sağlar. Ayrıca, bu teknolojiler maliyetleri düşürür ve kaynakların daha verimli kullanılmasına olanak tanır.

Yapay zeka, müşteri hizmetleri gibi alanlarda da yenilikçi çözümler sunarak müşteri memnuniyetini artırır ve sadakati pekiştirir. Veri analitiği ve tahmin yöntemleri, stratejik karar alma süreçlerini hızlandırırken, doğru bir şekilde uygulandığında firmalara önemli bir rekabet avantajı kazandırmaktadır. Bununla birlikte, yapay zeka uygulamalarının veri güvenliği, gizlilik ve etik gibi konuları titizlikle ele alınmalıdır.

Doğru stratejilerle hayata geçirildiğinde yapay zeka destekli sistemler, firmalara sürdürülebilir bir başarı sunar ve uzun vadeli büyüme hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynar. Bu teknolojiler, yenilikçi yöntemleri desteklerken aynı zamanda gelecekteki iş dünyasının şekillenmesine katkı sağlar.

Anahtar Kelimeler: İşletme Performansı, Maliyet Azaltma, Stratejik Karar Alma, Verimlilik, Yapay Zeka

THE IMPACT OF CHATGPT ON BUSINESSES AND ITS CONTRIBUTIONS TO ORGANIZATIONAL PERFORMANCE

Abstract

Artificial intelligence–based systems have the potential to elevate firms' performance to higher levels. These technologies enhance operational workflows by increasing speed and efficiency. For instance, AI solutions such as ChatGPT reduce repetitive and time-consuming tasks, enabling employees to focus on more creative and strategic activities. Additionally, such technologies lower operational costs and allow companies to utilize their resources more effectively.

Artificial intelligence also provides innovative solutions in areas such as customer service, enhancing customer satisfaction and strengthening loyalty. Data analytics and forecasting methods accelerate strategic decision-making processes and, when implemented properly, offer firms a significant competitive advantage. However, issues such as data security, privacy, and ethics must be addressed with great care.

When implemented with the right strategies, AI-supported systems offer companies sustainable success and play an important role in achieving long-term growth objectives. While these technologies support innovative methods, they also contribute to shaping the future of the business world.

Keywords: Business Performance, Cost Reduction, Strategic Decision-Making, Efficiency, Artificial Intelligence

1.GİRİŞ

Son yıllarda yapay zeka teknolojileri, iş dünyasında ve işletmelerin operasyonel alanlarda önemli değişikliklere neden olmuştur. Gelişen teknolojik yenilikler, firmaların pazarlama, üretim, finans, iç denetim ve insan kaynakları gibi farklı alanlarda daha etkili ve yenilikçi çözümler bulmasına yardımcı olmaktadır. Yapay zeka teknolojilerinin pazarlama süreçlerine entegre edilmesi, firmalara yeni bakış açıları kazandırmıştır (Zeydan, 2024). Üretken yapay zekanın iş dünyasına sunduğu fırsatlar kadar olası sınırlılıkları da mevcuttur, fakat bu teknolojinin gelecekte yüksek bir potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir (Ünal ve Kılınç, 2024). Yapay zeka uygulamaları, işletmelerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında önemli bir rol üstlenmektedir. Yapay zeka, kurumsal kaynak planlama sistemlerinde verimlilik artışı sağlarken analitik yetenekler sunar (Oğuz ve Ağtaş, 2024). Ayrıca, yapay zeka uygulamalarının Endüstri 4. 0 çerçevesinde müşteri memnuniyeti ve rekabet gücü üzerindeki etkileri de incelenmektedir (Sarnıç ve Acar, 2024).

Literatürde yapay zekanın kurumsal iletişim, iç denetim, muhasebe ve stratejik yönetim gibi farklı alanlarda ciddi avantajlar sunduğu görülmektedir. Yapay zeka, iç denetim süreçlerinde kullanılmakta fakat etik konuların titizlikle ele alınması gerekmektedir (Karaca, 2024). Yapay zeka teknolojileri, muhasebe ve denetim alanında fırsatlar sağlarken aynı zamanda riskleri de gündeme getirmektedir (Bağdat, 2024).

Dijital dönüşüm süreçlerinde yapay zekanın etkileri geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Yapay zeka, verimlilik artışı ve hizmet geliştirme potansiyeli ile önemli katkılar sunmaktadır (Koşar, 2024). Üretken yapay zeka, işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerinde belli fırsatlar sunmakla birlikte bazı zorluklar da yaratmaktadır (Yastıoğlu, 2023). Aynı zamanda yapay zeka, işletme yönetimi ve marka pazarlama stratejileri açısından işletme performansına olumlu katkılar yapmaktadır (Li, 2024).

Bu çalışma, ChatGPT gibi üretken yapay zeka uygulamalarının işletmeler üzerindeki etkilerini, sunduğu fırsatları ve katkılarını incelemeyi hedeflemektedir. Mevcut literatürden yola çıkarak, yapay zeka teknolojilerinin iş süreçlerine entegrasyonu ile kurumsal performans arasındaki ilişki ele alınacak ve bu teknolojilerin iş dünyasında sağladığı yenilikler ile gelecekteki potansiyelleri değerlendirilecektir.

2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İlknur ZEYDAN (2024), yapay zeka teknolojilerinin pazarlama alanına entegrasyonunu incelemekte ve bu teknolojilerin pazarlama süreçlerine sağladığı katkıları ortaya koyarak pazarlama anlayışına yeni ufuklar açmayı amaçlamaktadır.

Aslıhan ÜNAL- İzzet KILINÇ (2024) bu çalışmada, üretken yapay zekânın iş hayatını nasıl dönüştürdüğünü incelemeyi hedeflemektedir. Bu çerçevede, Web of Science veritabanındaki erken dönem araştırmalarına bakarak, üretken yapay zekânın kullanım alanlarını, olumsuz yönlerini, çözüm önerilerini ve gelecekteki potansiyel etkilerini belirlemek amaçlanmıştır.

Akpınar, A. ve Baskan, T. D. (2024) bu çalışma ile Türkiye'de 2022 yılında sürdürülebilirlik raporu yayınlayan şirketlerin sürdürülebilir gelişim hedeflerine ulaşmak için yapay zekâdan nasıl faydalandıklarını araştırmayı planlamaktadır. Bu çalışma, sürdürülebilir kalkınma hedefleri kapsamında yapay zekâ uygulamalarının kullanımını inceleyerek, sektör bazında analizler yaparak bu kullanımın sonuçlarını ortaya koymayı hedeflemektedir.

Gizem Oğuz ve Emine Ağtaş (2024) bu araştırmada, yapay zeka tekniklerinin kurumsal kaynak planlama (ERP) sistemlerinde nasıl sistematik bir şekilde kullanıldığını incelemeyi ve mevcut literatürü değerlendirerek katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Yapay zekanın ERP sistemleri içerisinde sağladığı verimlilik artışları, hatasız veri girişi, müşteri desteği, satış tahminleri ve tahmine dayalı analizler gibi konulardaki iyileştirmeleri araştırmak hedeflenmiştir.

Sarnıç, A. ve Acar, S. (2024) bu çalışmada, Endüstri 4. 0 çerçevesinde yapay zekâ uygulamalarının işletmelerdeki kullanımı ve iş süreçlerine etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Yapay zekâ teknolojilerinin

firmaların verimlilik, müşteri memnuniyeti ve rekabet avantajı üzerindeki etkileri analiz edilerek, bu alanla ilgili mevcut durum ve gelecekteki gelişim potansiyelleri ele alınmıştır.

Can, Ö. (2024) bu çalışmasında, yapay zekânın kurumsal iletişimdeki rolünü incelemek ve kurumlara sağladığı avantajları anlamak istemektedir. Çalışma, yapay zekâ kavramı ve alt bileşenleri üzerine yoğunlaşarak, kurumların iletişim süreçlerinde bu teknolojileri nasıl etkili bir biçimde kullanabileceklerine dair öneriler sunmayı amaçlamaktadır. Sonuç olarak, doğru yapay zekâ uygulamalarıyla sürdürülebilir başarı elde edebileceği ve kurumların rekabet avantajı kazanabilmek için somut adımlar atmaları gerektiği ifade edilmektedir.

Karaca, M. (2024) bu çalışmasında, yapay zekâ teknolojilerinin iç denetim süreçlerine entegrasyonunun verimlilik ve etkililik sağlayabilme potansiyelini araştırmaktadır. Çalışma, yapay zekâ destekli araçların iç denetim süreçlerinde verimliliği artırarak daha doğru kararların alınmasına katkı sağladığını gösterirken, veri güvenliği, algoritmik önyargı ve etik gibi risklerin yönetimi için kapsamlı bir çerçeve oluşturulması gerektiğini vurgulamaktadır.

Bağdat, A. (2024) bu çalışmasında, yapay zekânın muhasebe ve denetim alanındaki uygulamalarını, sunduğu fırsatları ve karşılaşılan zorlukları incelemektedir. Yapay zekânın rutin işlerin otomatikleştirilmesiyle verimliliği artacağı ancak mesleki becerilerin değişimi gerektireceği vurgulanmaktadır. Ayrıca, yapay zeka teknolojilerine uyum sağlamak amacıyla sürekli öğrenmenin önemi de belirtilmiştir.

Karahançer, D. ve Yücel, Ş. (2024) bu çalışmada, stratejik yönetim ve yapay zekâ konularındaki araştırmaları inceleyerek alanın boşluklarını tespit etmeyi hedeflemektedir. Araştırmada, 2020-2024 yılları arasında çeşitli veritabanlarından elde edilen 21 makale üzerinde içerik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma, stratejik yönetim ile yapay zekâ arasındaki ilişkiyi dijital dönüşüm, Endüstri 4. 0 ve 5. 0, akıllı sistemler, iş stratejileri, teknoloji benimseme süreçleri gibi kavramlarla ilişkilendirerek değerlendirmiştir. Ayrıca, akıllı sistemler, büyük veri, blok zinciri, IoT, yenilikçilik, sağlık, stratejik planlama gibi konulara da yer verilmiştir.

Koşar, M. E. (2024) bu çalışmasında, yapay zekâ ve dijital dönüşümün kamu yönetimine olan etkilerini incelemeye odaklanmaktadır. Yapay zekânın kamu sektöründe verimliliği artırma, karar alma süreçlerini iyileştirme ve hizmet sunumunu geliştirme potansiyeli bulunmaktadır. Çalışma, ulusal yapay zeka stratejilerinin oluşturulması, hukuki düzenlemelerin yapılması, yeniliklerin teşvik edilmesi ve üniversitelerde Yapay Zekâ Mühendisliği bölümlerinin yaygınlaştırılması gerektiği mesajını vermektedir.

Yastıoğlu S. (2023) bu eserinde, üretken yapay zekânın şirketlerde nasıl kullanıldığını ve sağladığı imkanları, karşılaşılan tehlikelerle birlikte ele almaktadır. Araştırma, bu teknolojilerin işletmelerin verimliliğini artırma kapasitesine dikkat çekerken, ayrıca çalışanların tutumları, veri güvenliği ve işgücü üzerindeki etkileri gibi endişeleri de gündeme getirmektedir. Bunun yanı sıra, şirketlerin dijital dönüşüm süreçlerine nasıl uyum sağlayabilecekleri ve çalışanları nasıl sürece dahil edebilecekleri ile ilgili öneriler sunulmaktadır.

Li, C. (2022) bu araştırmasında, yapay zekâ teknolojilerinin işletme yönetimindeki uygulamalarını değerlendiriyor. Yapay zekâ, mod tanıma, makine öğrenimi, veri madenciliği ve akıllı algoritmalar kullanarak işletmelerin yönetim süreçlerini geliştirmeyi amaçlar. Araştırma, CRM ve ERP gibi yazılımların veri toplama, üretim ve iş süreçlerini yönetme konusundaki katkılarını ve bulut tabanlı hizmetlerin şirket yönetimini nasıl etkilediğini inceleyecektir. Ayrıca, bu yeni teknolojilerin geleneksel işletme yönetimi teorileriyle nasıl bir araya getirilebileceği konusu da ele alınacaktır.

Li, L. (2024) bu çalışmasında, yapay zeka, küreselleşme ve dijitalleşmenin işletmelerin çevresel yenilikleri ve operasyonel verimliliği üzerindeki etkilerini incelemektedir. 2009-2016 yılları arasındaki Şanghay ve Shenzhen'deki A hisseli şirketlerine ait verilere dayanan bu araştırma, yapay zeka teknolojisinin işletmelerin sürdürülebilir kalkınmalarını nasıl desteklediğini ve uluslararası alım süreçlerinin operasyonel

performansı nasıl geliştirdiğini araştırmaktadır. Ayrıca, yapay zekanın kamu ve özel sektördeki şirketler üzerindeki farklı etkilerini ampirik olarak analiz etmektedir.

Liu, Y. (2021) bu çalışmasında, küçük ve orta ölçekli işletmelerin marka pazarlama taktiklerinde yapay zeka teknolojisinin rolünü incelemektedir. Araştırma, pazarlama sektöründe yapay zekanın mevcut durumunu ve gelecekteki gelişim trendlerini analiz etmektedir. Ayrıca, yapay zekanın marka pazarlamadaki faydaları, dezavantajları, fırsatları ve zorlukları üzerinde durarak, işletmelerin yapay zekayı daha etkili bir şekilde kullanmaları için stratejik önerilerde bulunmaktadır.

Madhavi, T. ve Kaveri, A. (2024) bu çalışmasında, Haydarabad'daki bilgi teknolojisi firmalarının işe alım ve seçim süreçlerindeki en yeni teknolojilerin, özellikle yapay zekâ, sohbet platformları, sosyal medya ve sanal gerçeklik gibi teknolojilerin etkisini araştırmaktadır. Araştırma, bu teknolojilerin aday tarama, topluluk oluşturma ve işe alım deneyimlerini nasıl dönüştürdüğünü incelemekle birlikte, Haydarabad'ın BT sektöründeki yetenek kazanım stratejilerini de anlamayı hedeflemektedir. Nicel anket metodolojisiyle gerçekleştirilmiş bu çalışma, işe alım süreçlerinin etkinliğini değerlendirerek sektördeki zorlukları ve en iyi uygulamaları vurgulamayı amaçlamaktadır.

Zuo, Y. (2024) bu çalışmasında, işletmelerin finansal bilgi risk faktörlerini yönetmek ve analiz etmek için yenilikçi bir yöntem geliştirmektedir. Yapay zeka ve BP sinir ağı algoritmalarını kullanarak oluşturulan bir risk yönetim modeli ile simülasyonlar sonucunda bu yöntemlerin finansal riskleri daha doğru tahmin etme ve yönetme kabiliyetine sahip olduğu gösterilmiştir. BP sinir ağı modelinin uyarı doğruluğu %97 olarak belirlenmiştir.

Kandeel, Saleh, Elrefae ve Elsantilc (2024) bu çalışmasında, yapay zekanın küçük ve orta ölçekli işletmelerin (KOBİ'ler) performansını nasıl artırabileceğini ele almıştır. Yapay zeka, idari süreçlerin otomasyonunu sağlama, verimliliği ve karlılığı artırma, çalışanların etkinliğini yükseltme gibi konularla KOBİ'lere önemli faydalar sunmaktadır. Sonuçlar, yapay zekanın KOBİ'lerin yıllık büyümelerini hızlandırmalarına ve operasyonel başarı elde etmelerine yardımcı olduğunu göstermektedir.

Yifei, Lingfeng, Hao ve Zuoxue (2024) bu çalışmasında, yapay zeka teknolojisinin Çin'deki üretim işletmelerinin ekonomik performansını nasıl geliştirebileceğini araştırmaktadır. Yapay zeka uygulamalarındaki her bir artışın, zamanla işletmenin ekonomik performansını artırdığı saptanmıştır. Ayrıca, yapay zekanın yüksek teknolojiye sahip olmayan işletmeler ve doğu-batı bölgelerinde bulunan işletmeler üzerinde olumlu bir etkide bulunduğu ortaya konmuştur. Çalışma, Çin hükümeti ve işletme yöneticileri için ekonomik performansı artırmaya yönelik öneriler sunmaktadır.

Meng ve Han (2021) bu araştırmalarında, Çin'in üretim sektöründe Yapay Zeka teknolojisinin ve yenilikçiliğin etkilerini inceler. İnnovasyon girdisi, Yapay Zeka teknolojisinin güçlendirilmesi ve Yapay Zeka performansı arasındaki ilişkiyi analiz eden çalışmanın bulguları, inovasyon girdisinin Yapay Zeka performansına faydalı bir etki sağladığını ve Yapay Zeka teknolojisinin bu bağlantıyı kısmen desteklediğini göstermektedir. Ayrıca, dış çevre ve firma kültürünün bu ilişkilerdeki düzenleyici rolleri de araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, üretim sektöründeki yapay zeka teknolojisinin uygulanması ile ilgili önemli veriler sunmaktadır.

Anurag, Vyas ve Lilhore (2023) bu çalışmalarında, Yapay Zeka'nın modern iş alanındaki etkilerini, sağladığı fırsatları ve ortaya çıkardığı sorunları ele alır. Yapay Zeka, otomasyon, verimlilik ve maliyet etkinliği sağlarken, ayrıca müşteri hizmetleri ve karar alma süreçlerini de iyileştirmiştir. Ancak, iş gücünün yer değiştirmesi, önyargı ve ayrımcılık gibi risklerden dolayı, şeffaflık, hesap verebilirlik ve eşit yarar dağılımı konusunda önlemler alınması şarttır.

3.YAPAY ZEKA'NIN İŞLETMELERE ETKİSİ

Yapay zeka, ticaret alanında devrim yaratmaya devam ederken, ChatGPT gibi yapay zeka uygulamaları, firmalar için kritik birer araç konumuna gelmiştir. Bu tür teknolojiler, işletmelerin işlem akışlarını daha

verimli hale getirme, müşterilerle daha etkili bir şekilde iletişim kurma ve yenilikçi çözümler yaratma fırsatları sunmaktadır. ChatGPT, müşteri hizmetleri, pazarlama, içerik üretimi ve karar destek sistemleri gibi birçok alanda kullanılma imkanı sağlamaktadır.

ChatGPT'nin firmalara sağladığı en önemli avantajlardan biri, zaman ve verimlilik tasarrufudur. Özellikle tekrarlayan görevlerin otomatikleştirilmesi, çalışanların stratejik görevlere yönelmesine olanak tanımaktadır. E-posta düzenleme süreçlerinde hız kazandırmaktadır. Müşteri hizmetlerinde kullanılan ChatGPT, sorulara hızlı ve doğru yanıtlar vererek müşteri memnuniyetini artırmakta; aynı zamanda şirketlerin maliyetlerini düşürmektedir. Üstelik, satış tahminleri, pazarlama kampanyalarının yönetimi ve veri analitiği gibi konularda da işletmelere yol göstermektedir.

Günümüzde dijital pazarlama ön planda olduğu için, işletmelere bu alanda büyük avantajlar sunmaktadır. ChatGPT'nin güçlü yönlerinden biri de metin analizi yaparak müşteri geri dönüşlerini değerlendirmek ve buna uygun stratejiler geliştirmektedir.

Eğitim ve öğrenme süreçlerinde ChatGPT, çalışanların gelişim programlarına dahil edilerek eğitim materyalleri hazırlamak ve çalışanların bilgiye erişimini hızlandırmak için kullanılmaktadır. Özellikle karmaşık bilgileri basit hale getirip anlaşılır kılma becerisi, hem eğitim hem de karar alma süreçlerinde büyük bir öneme sahiptir.

Ancak yapay zeka tabanlı teknolojilerin yaygın kullanımı ile veri güvenliği, algoritmik önyargı ve etik sorunlar gibi riskler de ortaya çıkmaktadır. ChatGPT'nin doğru bir şekilde yönetilmesi ve işletme süreçlerine entegrasyonu, bu risklerin azaltılması açısından kritik bir öneme sahiptir. Firmaların, bu teknolojinin sunduğu fırsatları değerlendirirken, aynı zamanda bu tür zorlukları da dikkate almaları gerekmektedir.

Sonuç olarak, ChatGPT, firmalara hem operasyonel hem de stratejik düzeyde önemli katkılarda bulunma potansiyeline sahiptir. Uygun bir şekilde kullanıldığında, yalnızca verimliliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda yenilik süreçlerini teşvik eder ve rekabet avantajı sağlar. Bu teknolojinin iş dünyasında yaygınlaşması, firmaların dijital dönüşüm süreçlerini hızlandırırken yeni iş modellerinin ve yaklaşımların gelişmesini de desteklemektedir.

4.YAPAY ZEKA'NIN KURUM PERFORMANSINA KATKILARI

Yapay zeka teknolojileri, firmaların performansını yükseltmede ve stratejik hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknolojiler, iş akışlarını iyileştirerek verimliliği artırmakta, aynı zamanda maliyetleri düşürmekte ve karar verme süreçlerini hızlandırmaktadır. Rutin işlerin otomasyonu ve büyük veri analizi sayesinde elde edilen öngörü yetenekleri, firmaların operasyonel verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Yapay zeka destekli araçlar, müşteri ilişkileri yönetimi (CRM) ve kurumsal kaynak planlama (ERP) sistemlerinde kullanıldığında, hatasız veri girişi, doğru satış tahminleri ve tahmine dayalı analizler gibi sonuçlar üreterek firmaların daha etkili bir şekilde yönetilmesine katkıda bulunmaktadır.

Ayrıca, yapay zeka uygulamalarının iç denetim, sürdürülebilirlik ve stratejik yönetim süreçlerine entegre edilmesi, işletmelerin çevresel ve sosyal sorumluluklarını yerine getirmelerine yardımcı olmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak adına yapay zekanın kullanılması, firmaların enerji verimliliğini artırmasına ve atık yönetimini optimize etmesine imkan sağlamaktadır. Günümüzde çevresel unsurların işletme yönetiminde giderek daha önemli hale gelmesiyle, yapay zeka bu hedeflere ulaşmada işletmelere güçlü bir destek sunmaktadır. Bununla birlikte, yapay zekâ teknolojilerinin etkin bir şekilde benimsenmesi, sadece teknolojik altyapının iyileştirilmesini değil, aynı zamanda insan kaynakları, eğitim programları ve etik yönetim politikalarının da geliştirilmesini gerektirmektedir.

Ayrıca, yapay zekâ, işletmelerin inovasyon süreçlerine katkıda bulunarak, dijital dönüşüm ve Endüstri 4.0 süreçlerini desteklemektedir. Üretimden pazarlamaya, müşteri hizmetlerinden iç denetim süreçlerine kadar pek çok alanda kullanılan bu teknolojiler, işletmelerin hem maliyet avantajı sağlamasına hem de rekabet

gücünü artırmasına olanak tanımaktadır. Aynı zamanda, bu teknolojiler veri analitiği ile işletmelerin uzun vadeli stratejiler geliştirmesine ve daha doğru kararlar almasına yardımcı olmaktadır.

Ancak yapay zekâ uygulamalarının etkili bir şekilde kullanılabilmesi için veri güvenliği, algoritmik önyargılar ve etik sorunlar gibi potansiyel risklerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. İşletmelerin, yapay zekânın getirdiği fırsatları değerlendirirken bu riskleri yönetmek için kapsamlı bir risk yönetimi çerçevesi oluşturması büyük önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra, yapay zekâ ile iş gücü dönüşümü arasında bir denge kurulması, çalışanların yapay zekâ teknolojilerine uyum sağlayabilmesi için sürekli öğrenme ve yetenek geliştirme programlarının uygulanması gereklidir.

Sonuç olarak, yapay zekâ teknolojileri, işletmelerin rekabet avantajı elde etmesini ve uzun vadeli başarı sağlamasını mümkün kılmaktadır. Bu teknolojilerin etkili bir şekilde kullanımı, kurum performansını artırmanın yanı sıra dijital dönüşüm ve inovasyon süreçlerini de desteklemekte, işletmelere hem yerel hem de uluslararası pazarlarda güçlü bir konum kazandırmaktadır. Bu bağlamda, yapay zekâya yapılan yatırımların işletmelerin gelecekteki başarıları için stratejik bir öncelik haline gelmesi kaçınılmazdır

5.SONUÇ

Yapay zekâ teknolojileri, işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerinde önemli bir itici güç olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle ChatGPT gibi üretken yapay zekâ uygulamaları, işletmelerin operasyonel süreçlerini daha etkin ve verimli hale getirmekle kalmamakta, aynı zamanda stratejik karar alma, müşteri ilişkileri yönetimi ve sürdürülebilirlik gibi alanlarda da yenilikçi çözümler sunmaktadır.

Bu çalışmada, yapay zekânın pazarlama, finans, iç denetim, kurumsal kaynak planlama (ERP) ve stratejik yönetim gibi işletme fonksiyonlarındaki katkıları incelenmiştir. Literatür incelemesi ve değerlendirmeler sonucunda, yapay zekâ teknolojilerinin işletmelerin performansını artırma, maliyetleri azaltma ve rekabet avantajı sağlama noktasında büyük bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, yapay zekâ teknolojilerinin sunduğu veri analitiği, tahmine dayalı analiz ve otomasyon gibi imkânlar, işletmelere iş süreçlerini optimize etme ve stratejik hedeflerine ulaşma fırsatları sunmaktadır

Bununla birlikte, yapay zekâ teknolojilerinin iş dünyasında geniş bir yelpazede kullanılmasının bazı riskleri de beraberinde getirdiği unutulmamalıdır. Veri güvenliği, algoritmik önyargı ve etik sorunlar, bu teknolojilerin uygulanmasında dikkatle ele alınması gereken önemli konular arasında yer almaktadır. Bu nedenle, yapay zekâ uygulamalarının başarılı bir şekilde entegre edilebilmesi için sadece teknolojik altyapının geliştirilmesi değil, aynı zamanda çalışanların eğitimi ve etik yönetim politikalarının da güçlendirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, ChatGPT gibi üretken yapay zekâ teknolojilerinin doğru kullanımı, işletmelerin yalnızca verimliliklerini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda inovasyon ve dijital dönüşüm süreçlerini destekleyerek sürdürülebilir bir büyüme sağlamalarına da katkıda bulunmaktadır. Gelecekte yapay zekâ teknolojilerinin daha da gelişmesiyle birlikte, işletmelerin iş modellerinde ve yönetim yaklaşımlarında daha derin değişimlerin yaşanması beklenmektedir. Bu bağlamda, işletmelerin bu teknolojileri stratejik bir vizyonla benimsemeleri ve riskleri fırsata dönüştürebilmeleri, uzun vadeli başarıları açısından kritik bir öneme sahiptir.

6. TARTIŞMA

Bu çalışma, yapay zekâ teknolojilerinin işletme fonksiyonlarında sadece operasyonel iyileştirmeler sağlamadığını, aynı zamanda işletmelerin stratejik yönelimlerini de şekillendirdiğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, veri odaklı yönetim anlayışının işletmeler için zorunlu hâle geldiğini ve yapay zekânın rekabet avantajının temel belirleyicilerinden biri olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca çalışma, yapay zekânın sunduğu fırsatların yanında etik, veri güvenliği ve algoritmik önyargı gibi risklerin de yönetilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu durum, teknolojik dönüşümün yalnızca altyapı yatırımlarıyla değil, güçlü bir yönetişim ve etik bilinçle desteklenmesi gerektiğine işaret etmektedir. Genel olarak çalışma, işletmelerin

yapay zekâ uygulamalarını stratejik bir bakış açısıyla ele almalarının, sürdürülebilir başarı ve dönüşüm süreçlerinde kritik bir rol oynadığını ortaya koyarak literatüre katkı sunmaktadır.

KAYNAKLAR

Akpınar, A., & Baskan, T. D. (2024). İşletmelerde Yapay Zekâ Uygulamalarının Muhasebe Sürecine ve Sürdürülebilirlik Amaçlarına Katkılarının İncelenmesi: Sürdürülebilirlik Endeksindeki İşletmelerde Bir Araştırma. Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 68, 107-116. https://doi.org/10.18070/erciyesiibd.1487898

Anurag, N., Vyas, N., & Lilhore, U. K. (2023). Transforming work: The impact of artificial intelligence (AI) on modern workplace. 2023 3rd International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences (ICTACS), Tashkent, Uzbekistan, 602-607. https://doi.org/10.1109/ICTACS59847.2023.10390258

Bağdat, A. (2024). Yapay zekânın muhasebe ve denetimde kullanımı: Fırsatlar ve tehditler. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya Meslek Yüksekokulu, Muhasebe ve Vergi Bölümü. https://doi.org/10.0000/xxxxxx

Can, Ö. (2024). Yapay zekâ teknolojilerinin kurumsal iletişimdeki rolünün değerlendirilmesi. Uluslararası Sosyal Bilimler Akademik Araştırmalar Dergisi, 8(15), 103-114. https://doi.org/10.58201/utsobilder.1497333

Gizem Oğuz, & Emine Ağtaş. (2024). Kurumsal Kaynak Planlanlama (ERP) Sistemlerinde Yapay Zeka Kullanımı. Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 8(2), 345-360. https://doi.org/10.30692/sisad.1442838

Karaca, M. (2024). Yapay zekânın iç denetime etkileri: Fırsatların yakalanması ve tehditlerin yönetilmesi. Denetişim Dergisi, 2024 Ek Sayı, 86-101. https://doi.org/10.0000/0000-0002-0409-8370

Karahançer, D., & Yücel, Ş. (2024, July 19–21). Stratejik yönetim ve yapay zekâ: İçerik analizi. Bingöl 2nd International Conference on Social Sciences.

Kandeel, M. E., Saleh, B. A., Elrefae, G., & Elsantil, Y. G. (2024). Empowering small and medium enterprises (SMEs) through artificial intelligence. 2024 Fifth International Conference on Intelligent Data Science Technologies and Applications (IDSTA), Dubrovnik, Croatia, 191-196. https://doi.org/10.1109/IDSTA62194.2024.10746984

Koşar, M. E. (2024). Dijitalleşme ve yapay zekânın kamu yönetimine etkisi (Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü). Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hikmet Salahaddin Geziçi.

Li, C. (2022). The impact and response of artificial intelligence on the theory of enterprise management. 2022 3rd International Conference on Electronic Communication and Artificial Intelligence (IWECAI), Zhuhai, China, 314-317. https://doi.org/10.1109/IWECAI55315.2022.00067

Li, L. (2024). Research on the impact of artificial intelligence and internationalization on sustainable development of enterprises. 2024 7th International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD), Chengdu, China, 538-542. https://doi.org/10.1109/ICAIBD62003.2024.10604496

Liu, Y. (2021). Enterprise brand marketing strategy under the background of artificial intelligence. 2021 International Conference on Forthcoming Networks and Sustainability in AIoT Era (FoNeS-AIoT), Nicosia, Turkey, 115-119. https://doi.org/10.1109/FoNeS-AIoT54873.2021.00033

Madhavi, T., & Kaveri, A. (2024). The impact of artificial intelligence in recruitment and selection processes in IT companies. 16th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Iasi, Romania, 1-5. https://doi.org/10.1109/ECAI61503.2024.10607464

Meng, F., & Han, B. (2021). Research on the impact of innovation input on artificial intelligence technology empowerment and performance of manufacturing enterprises. 2021 International Conference on Education, Information Management and Service Science (EIMSS), Xi'an, China, 596-600. https://doi.org/10.1109/EIMSS53851.2021.00134

Sarnıç, A., & Acar, S. (2024). Dördüncü endüstri devrinde işletmelerde yapay zekâ uygulamaları örnekleri üzerine nitel bir araştırma. İşletme, 5(2), 155-181. https://doi.org/10.57116/isletme.1521169

Ünal, A., & Kılınç, İ. (2024). Üretken yapay zekâların iş dünyası üzerine etkilerine ilişkin erken dönem bir değerlendirme. Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi, 23(90), 776-797. https://doi.org/10.17755/esosder.1411805

Yastıoğlu, S. (2023). Üretken Yapay Zekânın İşletmelerde Kullanımı: Fırsatlar ve Tehditler. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, İİBF, İşletme Bölümü, Yönetim ve Organizasyon Anabilim Dalı. https://doi.org/10.58830/ozgur.pub137.c1391

Yifei, C., Lingfeng, H., Hao, J., & Zuoxue, L. (2024). Artificial intelligence as a new engine for boosting economic performance of manufacturing enterprises. 2024 IEEE 24th International Conference on Software Quality, Reliability, and Security Companion (QRS-C), Cambridge, United Kingdom, 1275-1283. https://doi.org/10.1109/QRS-C63300.2024.00166

Zeydan, İ. (2024). Yapay zekâ-pazarlama entegrasyonu: Örnek uygulamalar. International Journal of Management Economics and Business, 20 (ICMEB'24 Special Issue). https://doi.org/10.17130/ijmeb.1486507

Zuo, Y. (2024). Automatic analysis system for enterprise financial information based on artificial intelligence. 2024 International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems (ICICACS), Raichur, India, 1-5. https://doi.org/10.1109/ICICACS60521.2024.10499135

DÖRT TEKERLEKLİ KARGO BİSİKLETİ İÇİN GEREKLİLİK, TASARIM ÖLÇÜTLERİ VE TEMEL DOĞRULAMA YÖNTEMLERİ

Prof. Dr. MUSTAFA YAŞAR
Karabük Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği
myasar@karabuk.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9354-3554

MEHMET YASIN HAMZAOĞLU
Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği
myhamzaoglu@gmail.com

Özet

Bu çalışmada, artan e-ticaret hacmi ve kentleşme baskısı altındaki son mil teslimat lojistiği için sürdürülebilir bir çözüm olarak geliştirilen, pedal destekli dört tekerlekli özgün bir yük bisikleti (ÖDT-YB) tasarımı ve etkileri incelenmiştir. Mevcut iki ve üç tekerlekli kargo bisikletleri, sırasıyla denge ve devrilme sorunları nedeniyle ağır yük taşımacılığı görevinde yetersiz kalmaktadır. Mühendislik gerekliliklerine yanıt olarak dört tekerlekli pedal destekli yük bisikleti sınıfının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Çalışma, sadece bu gerekliliği savunmakla kalmayıp, bu araçların nasıl tasarlanması gerektiğini ve nasıl doğrulanacağını belirleyen bütüncül bir metodolojik çerçeve sunmaktadır. Önerilen bu çerçeve, bir tasarımın pazara hazır ve güvenli kabul edilmesi için üç zorunlu analiz yönteminin sonuçlarına sahip olması gerektiğini tanımlar: (1) Dijital insan modellemesi ile Ergonomik Uygunluk, (2) Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile Yapısal Bütünlük ve (3) DIN 79010 gibi ileri düzenlemeleri hedefleyen Standart Uyumu. Bu yaklaşım, söz konusu araçları basit "modifiye bisikletler" statüsünden çıkarıp "hafif ticari bisiklet" sınıfına yükselterek, gelecekteki tüm tasarım ve üretim süreçleri için temel bir mühendislik geliştirme kılavuzu oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dört tekerlekli kargo bisikleti, Hafif ticari bisiklet, Kentsel lojistik, Yapısal analiz, Ergonomi.

NECESSITY, DESIGN CRITERIA AND BASIC VERIFICATION METHODS FOR FOUR-WHEELED CARGO BICYCLES

Abstract

In this template, the design and effects of a unique pedal-assisted four-wheeled cargo bicycle (ÖDT-YB), developed as a sustainable solution for last-mile delivery logistics under the pressure of increasing e-commerce volume and urbanization, were investigated. Existing two- and three-wheeled cargo bicycles remain insufficient for heavy load transport duties due to balance and tipping issues, respectively. This study demonstrates the necessity of the four-wheeled pedal-assisted cargo bicycle class in response to engineering requirements. The study not only advocates for this necessity but also presents a holistic methodological framework defining how these vehicles should be designed and verified. The proposed framework defines that for a design to be considered market-ready and safe, it must possess results from three mandatory analysis methods: (1) Ergonomic Suitability via digital human modeling, (2) Structural Integrity via Finite Element Analysis (FEA), and (3) Standard Compliance aiming for advanced regulations like DIN 79010. This approach elevates the vehicles in question from the status of simple "modified bicycles" to the "light commercial bicycle" class, establishing a fundamental engineering development guideline for all future design and production processes.

Keywords: Four-wheeled cargo bike, Light commercial bike, Urban logistics, Structural analysis, Ergonomics.

1. GİRİŞ

Artan kentleşme ve e-ticaret hacmindeki logaritmik büyüme, "son mil" lojistiğini sürdürülemez bir baskı altına almıştır. İçten yanmalı hafif ticari araçlara dayalı geleneksel model, trafik sıkışıklığı ve karbon emisyonları nedeniyle artık geçerliliğini yitirmektedir. Bu soruna çözüm olarak sunulan iki tekerlekli kargo bisikletleri, ağır yük altında denge sorunları yaşarken; üç tekerlekli modeller virajlarda devrilme riski taşımaktadır. Bu durum, sadece bir araç eksikliğini değil, lojistik operasyonların güvenliğini tehdit eden sistemsel bir boşluğu işaret etmektedir.

Bu çalışma, söz konusu boşluğun ancak dört tekerlekli, pedal destekli ve yüksek stabiliteye sahip yeni bir araç sınıfı ile doldurulabileceğini savunmaktadır. Ancak bu araçların pazara sunulması, basit bir bisiklet modifikasyonunun ötesinde, titiz bir mühendislik doğrulaması gerektirir. Bu bağlamda çalışma, dört tekerlekli kargo bisikletlerini "hafif ticari bisiklet" olarak tanımlamakta ve bu sınıfın güvenli gelişimi için ergonomik uygunluk, yapısal bütünlük ve yasal standart analizi üzerine kurulu üçlü bir doğrulama metodolojisi önermektedir. Yeşil Mutabakat hedefleri, bu tür yeni ve etkin çözümleri zorunlu kılmaktadır (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2021).

2. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde, çalışmanın temelini oluşturan özgün araç tasarımının teknik detayları ve bu tasarımın güvenliğinin doğrulanması için izlenen metodolojik adımlar sunulmaktadır. Araştırma süreci, hafif ticari bisiklet konseptine uygun tasarım ölçütlerinin belirlenmesiyle başlayıp, aracın ergonomik, yapısal ve yasal uygunluğunu test eden üç aşamalı bir doğrulama yöntemiyle devam eden sistematik bir akışı takip etmektedir.

2.1. Tasarım Ölçütleri:

Hafif ticari bisiklet konsepti tasarım ölçütleri. Araştırma kapsamında geliştirilen Özgün Dört Tekerlekli Yük Bisikleti (ÖDT-YB), kentsel lojistiğin ağır şartlarına dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Aracın boyutlandırma ve güç aktarım parametreleri belirlenirken, hem TS EN 15194 (EPAC) yasal sınırlarına uyum hem de kentsel altyapıya (bisiklet yolları, kapılar vb.) fiziksel entegrasyon hedeflenmiştir. Aracın temel teknik özellikleri ve yasal uyum parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur.. Tasarımın temel ölçütleri şunlardır:

Tablo 1. ÖDT-YB Teknik Özellikleri ve Yasal Uyum Parametreleri

Parametre	**Değer**	**Birim**	**Referans / Amaç**
Yasal Sınırlar			
Maks. Sürekli Nominal Güç	250	W	TS EN 15194 Uyumu
Maks. Destek Hızı	25	km/s	TS EN 15194 Uyumu
Fiziksel Boyutlar			
Toplam Genişlik	880	mm	Bisiklet Yolu Standartları (<900mm)
Toplam Uzunluk	2500	mm	Manevra Kabiliyeti
Toplam Yükseklik	1600	mm	Sürücü Görüş Açısı ve Kabin
Operasyonel Özellikler			
Maks. Yük Kapasitesi	150	Kg	Ticari Lojistik Gereksinimi
Tekerlek Çapı	20	İnç	Düşük Ağırlık Merkezi / Tork

Boş Ağırlık (Batarya Dahil)	~65	Kg	Enerji Verimliliği

Bu tablodaki veriler ışığında, aracın tasarımında şu temel mühendislik hedefleri gözetilmiştir:

- **Stabilite:** Dört tekerlekli yapı ve bağımsız süspansiyon sistemi ile devrilme riskinin minimizasyonu (Johnson ve Rose, 2013).
- **Altyapı Uyumu:** 880 mm genişlik değeri, aracın standart bisiklet yollarını ve kentsel engelleri (dubalar vb.) sorunsuz geçebilmesini sağlamaktadır.
- **Ticari Yeterlilik:** 150 kg kargo kapasitesi, son mil teslimatındaki paket hacimlerinin büyük çoğunluğunu kapsamaktadır (Narayanan ve Antoniou, 2022).
- **Kabin Yapısı:** Sürücüyü hava koşullarından koruyan yarı kapalı ergonomik kabin.

2.2. Doğrulama Yöntemleri

Önerilen metodolojik çerçeve, aracın güvenliğini ve kullanılabilirliğini garanti altına almak için aşağıdaki üç analiz yöntemini zorunlu kılmaktadır:

2.2.1. Ergonomik Uygunluk Analizi:

Sürücünün uzun çalışma saatleri boyunca maruz kalacağı fiziksel stresi ölçmek amacıyla dijital insan modellemesi (RAMSIS) kullanılmıştır. Farklı persentil (P5-P95) ölçülerindeki sürücülerin görüş açıları, erişim mesafeleri ve postüral konforu analiz edilmiştir.

2.2.2. Yapısal Bütünlük Analizi (FEA):

Aracın şasi ve süspansiyon elemanlarının, azami yük (300 kg brüt) ve dinamik yol koşulları altındaki dayanıklılığı Sonlu Elemanlar Analizi (ANSYS Workbench) ile test edilmiştir. Analizlerde von Mises gerilmeleri ve toplam deformasyon değerleri incelenmiştir.

2.2.3. Kritik Standart Analizi:

Aracın teknik özellikleri, mevcut TS EN 15194 standardı ve gelişmiş DIN 79010 standardı kriterlerine göre karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu yöntem, yasal boşlukları ve tasarımın güvenlik gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını belirlemek için kullanılmıştır (Deutsches Institut für Normung, 2020).

3. SONUÇ

Önerilen üçlü doğrulama çerçevesi kapsamında gerçekleştirilen analizlerden elde edilen bulgular, bu bölümde detaylandırılmaktadır. Tasarlanan dört tekerlekli platformun 'hafif ticari bisiklet' sınıfı için öngörülen güvenlik, konfor ve yasal uyum kriterlerini ne ölçüde karşıladığı, elde edilen nicel veriler ve çıktıları ışığında aşağıda sunulmuştur.

3.1. Ergonomik Uygunluk Bulguları

Dijital insan modellemesi sonuçları, tasarlanan dik sürüş pozisyonunun ("komuta merkezi"), geleneksel bisikletlere kıyasla bel ve boyun bölgesindeki stresi %35 oranına kadar azalttılacağını göstermiştir. Geniş görüş açısı ve ayarlanabilir koltuk yapısı, farklı fiziksel özelliklere sahip kuryeler için güvenli ve konforlu bir çalışma ortamı sağlanabilir. Bu bulgu, aracın sadece bir taşıma aracı değil, aynı zamanda profesyonel bir iş yeri olarak tasarlandığını doğrulamak için kullanılabilir.

3.2. Yapısal Bütünlük Bulguları

FEA analizleri, özgün şasi tasarımının azami yükleme senaryolarında dahi güvenli sınırlar içinde kaldığını kanıtlanabilir. Kritik bağlantı noktalarındaki gerilim değerleri, malzeme akma dayanımının altında kalmış ve yüksek güvenlik faktörü elde edilmiştir. Maksimum deformasyonun 2,1 mm seviyesinde kalması, şasinin yük taşıma rijitliğinin yeterli olduğunu gösterir. Bu sonuçlara ulaşıldığında, dört tekerlekli yapının ağır yük taşımacılığında ihtiyaç duyulan mekanik güvenilirliği sağladığını ortaya koyulabilir.

3.3. Kritik Standart Analizi Bulguları

Yapılan analizler, mevcut TS EN 15194 standardının, bu sınıf araçların (özellikle frenleme ve yapısal testler açısından) güvenlik gereksinimlerini karşılamada yetersiz kaldığını göstermiştir. Buna karşın, tasarımın DIN 79010 gibi daha spesifik standartların kriterleriyle büyük ölçüde uyumlu olması gerekir, ancak bağımsız süspansiyon sistemleri için yeni test protokollerine ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir.

4. TARTIŞMA

Bu çalışma, kent lojistiğinin geleceği için dört tekerlekli kargo bisikletlerinin bir tercih değil, bir zorunluluk olduğunu ortaya koymuştur. Ancak bu araçların başarılı olabilmesi için "modifiye bisiklet" algısından kurtulup "hafif ticari bisiklet" disipliniyle ele alınması gerekmektedir. Çalışmanın önerdiği ve uyguladığı üçlü doğrulama çerçevesi (Ergonomi, Yapısal Analiz, Standart Analizi), bu yeni araç sınıfının güvenli, verimli ve yasal olarak uyumlu bir şekilde geliştirilmesi için somut bir yol haritası sunmaktadır. Elde edilen bulgular, tasarlanan aracın bu kriterleri başarıyla karşıladığını ve kentsel lojistikte etkin bir çözüm adayı olduğunu doğrulamaktadır. Tasarım ve çevre etkilerinin daha detaylı irdelenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2020), *DIN 79010:2020-02 Cycles - Transportation bikes and cargo bikes*, Berlin: DIN.

T.C. TİCARET BAKANLIĞI (2021), *Yeşil Mutabakat Eylem Planı*, Ankara: T.C. Ticaret Bakanlığı.

TÜRK STANDARTLARI ENSTİTÜSÜ (2017), *TS EN 15194 Bisikletler - Elektrik güç destekli bisikletler (EPAC)*, Ankara: TSE.

JOHNSON, D. ve ROSE, G. (2013), Stability and Control of Freight Tricycles, *Vehicle System Dynamics*, 51(9), 1405-1424.

NARAYANAN, S. ve ANTONIOU, C. (2022), Electric cargo bikes in urban areas: Systematic review, *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 8(5), 145–160.

İSTANBUL SULARINDA YASADIŞI AVCILIKTA KULLANILAN TEKNELERİN LOA/B ORANINA GÖRE TEKNİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

SAMET YILDIRIM
Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Ürünleri ABD
samet.yildirim@tarimorman.gov.tr, ORCID: 0009-0006-4884-2663

Prof. Dr. HAMDİ AYDIN
Kocaeli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü
aydin@kocaeli.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3854-6047

Özet

Bu çalışmada, İstanbul sularında 2020–2025 yılları arasında yasadışı su ürünleri avcılığı kapsamında el konulan teknelerin Loa/B (Tam Boy/Kütük Eni) oranına göre teknik özellikleri değerlendirilmiştir. 22 Kasım 2019 tarihli ve 30956 sayılı Resmî Gazete 'de yayımlanan, 7091 sayılı Kanun ile 1380 sayılı Su Ürünleri Kanunu'nda yapılan değişiklik sonrasında, yasadışı avcılığa yönelik cezai yaptırımlar ve tekneye el koyma uygulamaları daha somut ve uygulanabilir hale getirilmiştir. Bu kapsamda, 1 Ocak 2020–25 Haziran 2025 tarihleri arasında İstanbul'da toplam 227 tekneye el konulmuştur. Bunların 75'i trol, 126'sı çift kabuklu yumuşakça ve deniz salyangozu, 25'i içsu, 1'i ise uzatma ağ avcılığında kullanılmıştır. Çalışmada, resmi kayıtlarda teknik ölçüleri bulunan 51 trol ve 35 yumuşakça/salyangoz avcısı olmak üzere toplam 86 tekne değerlendirilmiştir. Sonuçlar, yasadışı trol avcılığında yıllar içinde değişken Loa/B oranına sahip teknelerin tercih edildiğini göstermiştir. Bu durumun temel nedenleri arasında hedef popülasyonun tahmini miktarı, denetimlerden kaçınma isteği ve ekonomik kısıtlılıklar öne çıkmaktadır. Yasadışı çift kabuklu yumuşakça ve deniz salyangozu avcılığında ise 4–8 m tam boya ve yüksek Loa/B oranına sahip ahşap teknelerin daha yaygın olarak kullanıldığı belirlenmiştir. Bulgular, Loa/B oranının yasadışı avcılık eğilimlerinde önemli bir belirleyici olabileceğini göstermekte ve küçük ölçekli balıkçılıkta etkin denetim ve yönetim stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yasadışı avcılık, trol avcılığı, çift kabuklu yumuşakça, tekne oranı, İstanbul suları.

EVALUATION OF THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF BOATS USED FOR ILLEGAL FISHING IN ISTANBUL WATERS BASED ON THEIR LOA/B RATIO

Abstract

In this study, the technical characteristics of vessels seized for illegal fishing in Istanbul waters between 2020 and 2025 were evaluated according to their Loa/B (Length Overall/Beam) ratio. Following the amendments made to Fisheries Law No. 1380 by Law No. 7091, published in the Official Gazette dated November 22, 2019, and numbered 30956, criminal penalties for illegal fishing and vessel seizure practices have been made more concrete and enforceable. Within this scope, a total of 227 vessels were seized in Istanbul between January 1, 2020, and June 25, 2025. Of these, 75 were trawlers, 126 were used for bivalve mollusk and sea snail fishing, 25 were used for inland water fishing, and 1 was used for gillnet fishing. The study evaluated a total of 86 vessels, including 51 trawlers and 35 bivalve/snail fishing vessels with technical measurements in official records. The results showed that vessels with variable Loa/B ratios over the years were preferred for illegal trawling. The main reasons for this include the estimated quantity of the target population, the desire to avoid inspections, and economic constraints. In illegal bivalve mollusk and sea snail fishing, wooden vessels with a full length of 4–8 m and a high Loa/B ratio were found to be more commonly used. The findings suggest that the Loa/B ratio may be an important determinant of illegal fishing tendencies and contribute to the development of effective control and management strategies in small-scale fisheries.

Keywords: Illegal fishing, trawl fishery, bivalve mollusk fishery, vessel proportion, Istanbul waters.

1. GİRİŞ

Türkiye, üç tarafı denizlerle çevrili olup bolca içsu kaynağına ev sahipliği yapmasının yanında, denizel kaynaklar açısından İstanbul Boğazı gibi karmaşık bir akıntı ve göç sistemindeki önemli bir habitata sahiptir. Bu boğaz, Karadeniz, Marmara ve Ege denizi üzerinden Akdeniz'e kadar ulaşan popülasyon hareketliliğinde doğrudan etkilidir. Gerek türlerin göç faaliyetleri esnasında konaklamaları, gerek de Marmara Denizi'nin yerli su ürünleri bölgeyi su ürünleri avcılığında önemli konuma sokmakta ve getirilen yasal zorunluluklara uyulmaması kaçak avcılığı önemli bir sorun haline getirmektedir. Bu bağlamda çeşitli dönemlerde deniz ve içsularımızda yaşayan türlerin üreme, yaşam döngüsü ve fiziksel özellikleri ile bulundukları habitatların doğal şartlarına göre su ürünleri mevzuatı hazırlanmış, bu mevzuat da zamanla gelişip değişen avcılık teknikleri ve tespit edilen sektörel realiteye göre güncellenmiştir.

Balıkçılık faaliyetleri, sucul ekosistemlerin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak, yasa dışı, kayıt dışı ve düzenlenmemiş avcılık hem stokların azalmasına hem de ekosistem dengesinin bozulmasına neden olan küresel bir sorun olarak varlığını sürdürmektedir. Türkiye'de de benzer şekilde, özellikle kıyı balıkçılığı yapılan bölgelerde yasa dışı avcılık faaliyetleri, biyolojik çeşitlilik ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından önemli tehditler oluşturmaktadır.

İstanbul ili, coğrafi konumu itibarıyla Karadeniz, Marmara Denizi ve Haliç gibi farklı denizel ve içsu ekosistemlerini barındırması nedeniyle su ürünleri avcılığı açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bu bölgelerde yapılan ticari ve amatör avcılık faaliyetleri, yasal sınırlar içerisinde yürütüldüğünde bölge ekonomisine katkı sağlamakta, ancak yasa dışı yöntemlerle gerçekleştirildiğinde ekosistem bütünlüğünü zedelemektedir. Özellikle trol, parakete ve ağ gibi av araçlarının yasak alanlarda veya uygun olmayan boyutlarda kullanılması hem hedef türleri hem de ekosistemdeki diğer canlıları olumsuz etkilemektedir.

Yasadışı avcılıkta kullanılan teknelerin teknik özelliklerinin belirlenmesi, bu faaliyetlerin mekânsal ve yapısal boyutlarının anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır. Tekne boyu, en oranı, motor gücü ve av donanımı gibi teknik parametreler, yasa dışı avcılığın türüne ve etkinliğine doğrudan etki eden unsurlar olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, İstanbul ili sınırları içerisinde deniz ve içsularda yasa dışı avcılıkta kullanılan teknelerin teknik özelliklerinin incelenmesi hem denetim mekanizmalarının geliştirilmesi hem de sürdürülebilir balıkçılık politikalarının oluşturulmasına bilimsel katkı sağlayacaktır.

Çalışmamızın kapsamı içine giren yasadışı trol avcılığının yasal ilerleyen formunda genellikle açık denizlerde 30-40 metre derinliğindeki sahilden 2-3 deniz mili açıklığındaki bölgelerde bir veya iki gemi ile dipte 2-3 knots, orta derinlikte veya yüzeyde 5-6 knots trol çekme hızı ile deniz taraması yapılmaktadır. Dip trolü ile dip ve dibe yakın bölgelerde hareket durumundaki ya da dibe tutunmuş haldeki demersal ve bentik su türlerinin avcılığı yapılmaktadır. Orta su ve yüzey trolünde ise dibe sürünmeden denizin değişik derinliklerinde kullanılan trol ağları ile sürü şeklinde bulunan pelajik balıkların avcılığı ana hedeftir (Çelikkale ve Diğ, 1993).

İstanbul sularında kullanılan yasadışı trol avcısı tekneler ise genellikle geriden çekmeli, tek başına avcılık yapan ve üzerinde 1adet trol takımı (150 metre ağ, iki adet trol kapısı) bulunduran küçük ebatlardaki (5-15 m) teknelerdir. Bu tekneler ağırlıklı olarak gece saatlerinde, ortalama 1-1,5 saat süren, bir veya iki trol operasyonu gerçekleştirerek avları ile karaya çıkış noktalarına geri dönmektedir. Bu durum kaçak trol avcısı teknelerinin av operasyonunu kısa tutup yasal bir operasyondan daha kısa sürede dönüş sağlamak için hızlı olmaları gerektiğini ifade eder. Bununla birlikte denetim ekipleri ile olası şahitlerden saklanabilmek amacıyla mümkün olduğunca küçük ebatta imal edilmiş teknelerin yasadışı avcılıkta seçilmesini zorunlu hale getirir.

Çalışmamızın konusu bir diğer avcılık türü olan çift kabuklu yumuşakça ve deniz salyangozu avcılığında ise deniz dibindeki bentik türler (kara midye, beyaz kum midyesi, kum şırlanı ve deniz salyangozu) tekne ile habitatlarının bulunduğu kıyıya yakın yerlere gidilerek dalma yöntemi veya algarna ve dreçler yardımı ile avlanır. Bu avcılıkta tekne, çoğunlukla avcılığa yardımcı bir vasıf üstlenmektedir. Avcılığı gerçekleştiren

dalgıcın su altında kalmasını ve avlanmasını sağlayacak ekipmanların (algarna, dreçler, kompresör, çeşitli ebatlardaki fileler, dalış tüpleri, dalgıç kıyafetleri, regülatörler vs.) ve avlanan su ürünlerinin taşınmasında kullanılan tekneler, ebatları bakımından işlevsel olmalıdır.

Bu tekneler teknik özellikleri bakımından kıyı ve kıyı ötesi balıkçı teknesi karakterini taşıyan, büyük ölçüde kıyılarda avlanan yakın sahil teknesi olma özelliklerini göstermektedir. Ülkemizin balıkçı filosunda devlet tarafından sağlanan teşvik tedbirleri ve ithalatta sağlanan kolaylıklar sayesinde özellikle 1983 yılından sonra önemli gelişmeler görülmüştür (Dinçer, 1996). 1980'li yıllara kadar ülkemiz sularındaki balıkçı gemileri, taka, çektirme ve alametro tipi olarak sınıflandırılmıştır.

Takalar, ahşap yapıda inşa edilen, güverte şiyer eğrisinin baş taraf yükseltisi aşırı, baş kısım postaları açılmaya uğramış ve kıç bodoslaması aynalıkla son bulan, önceleri yelken, teknolojinin gelişmesiyle de motorla sevk olunan Karadeniz tipi balıkçı tekneleridir (Aydın, 2002). Çektirmeler, ahşap yapıda, hafif dolgun başlı, narin kıç formunda ve kuvvetli bir şiyer eğrisi olan tekne gurubudur. Alametro tipi balıkçı gemileri ise taka formunun ihtiyaçlara göre modernize edilip değişikliğe uğratılması ile çoğunlukla karpuz kıç modelinde düzenlenmiş teknelerdir (Aydın, 2002).

Bu üç gurubun da su altı formlarının direnç ve sevk açısından elverişsizliği, su altı hacim merkezlerinin orta kısımdan başa doğru yönelmesi, kıç bodoslama ve pervane yuvalarının gemiyi maksimum verimli sevke yeterince elverişli olmaması, dümen tutma özelliklerinin zayıflığı, ağlar için yeterli kıç ve güverte alanına sahip olmamaları nedeniyle çalışma etkinliklerinin sınırlı oluşu ve yapımlarında kullanılan malzemelerin kalite ve ölçü yönünden yetersizliği gibi çözülmeyi bekleyen temel sorunları vardır (Aydın, 2002). Çalışma kapsamımızdaki yasadışı avcılıkta kullanılmış trol avcısı tekneler sandal, kayık, eski alametro tiplerinde, çift kabuklu yumuşakça ve deniz salyangozu avcısı tekneler ise fiber bot tipi yahut ahşap sandal tipi teknelerdir.

Balıkçı teknelerindeki temel ölçü birimleri uzunluk, genişlik ve derinlik olup, bir geminin kapasitesinin belirlenmesinde en önemli unsurlardır. Literatür adları ile tanımlayacak olursak Tam Boy (Loa); geminin pruva başlangıcı ile pupa sonu arasındaki yatay mesafedir. Kalıp genişliği (B), geminin en geniş kısmındaki yatay mesafedir. Kalıp derinliği (D), geminin ortasında, omurga üstünden ana güverteye kadar olan mesafedir. Draft (d), geminin omurgasının üstünden yüklü su hattına kadar olan mesafedir. Fribord (F) ise yüklü geminin ortasında su hattında ana güvertenin üstüne kadar yükseklikliktir. Derinlikten draftı çıkararak fribordu bulabiliriz. Eğer yaptırılacak balıkçı gemisinin hızının arttırılması isteniyorsa pahalı bir yatırım olan tekneye daha güçlü bir makine konulması yerine teknenin tam boyunun arttırılması ekonomik olması nedeniyle daha mantıklıdır (MEGEP, 2008). Ancak tekne ana boyutlarının hesap yapılmadan büyütülmesi, daha geniş bir çalışma olanağı sunmasına ve enine dengeyi daha iyi hale getirmesine rağmen; su direnci yüksek, manevra yeteneği kısıtlı ve mukavemeti tartışılabilecek hantal gemilerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir (Peşman, 2005).

Teknede boy artırımının hızlanmayı sağlaması ise tekneye su tarafından uygulanan direncin düşmesi ile ilgilidir. Konuya açıklık getirecek olursak; bir geminin belirli bir hızla suda hareket etmesinden dolayı su tarafından geminin hareket yönüne zıt olarak uygulanan kuvvetlerin bileşkesine direnç kuvveti denir. Gemi ıslak yüzeyine etki eden bu kuvvetler teğetsel ve normal kuvvetler olarak ikiye ayrılır. Teğetsel kuvvetlerin bileşkesini sürtünme direnci, normal kuvvetlerin bileşkesini ise basınç direnci oluşturur. Olaya enerji açısından bakıldığında ise bir geminin hareketine karşı koyan direnci geminin içinde bulunduğu suyun akışkanlığı ile ilgili olan viskoz direnç ve geminin su yüzeyinde sürekli olarak dalga oluşturmasından ileri gelen dalga direnci olarak iki ana bileşene ayırabiliriz. Gemi direnci ile ilgili hesaplamalarda dış faktörler dikkate alınmaz; gemi yüzeyinin pürüzsüz ve temiz olduğu, deniz ortamının dalgasız ve akıntısız olduğu ve havanın rüzgârsız olup hava direncinin olmadığı varsayılarak hesaplamalar yapılır (Aydın, 2002) Serbest su yüzeyinde hareket eden bir geminin direnci ise teknenin ilerleme hızına, geminin su hattı boyuna, suyun kütlesel yoğunluğuna, ortamın yer çekimi ivmesine, suyun dinamik vizkozitesine, geminin orta kesit alanına, geminin genişlik/en oranına ve geminin genişlik/su çekim oranına bağlı olarak değişir (Peşman,

2005). Çalışmamızda tam boy ve kalıp genişliği değerlerini kullanarak diğer değişkenleri sabit kabul edeceğiz.

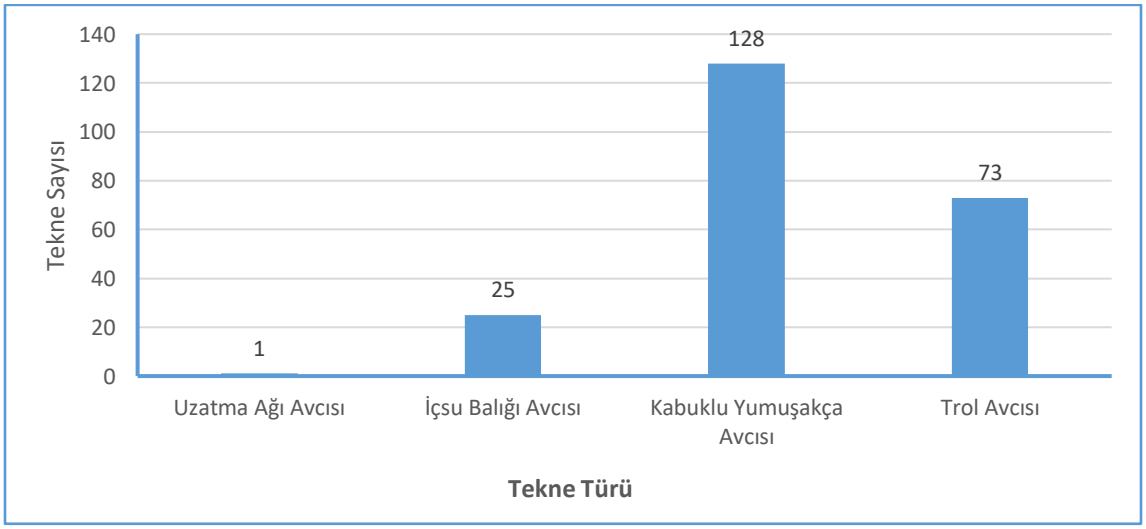
Bu çalışmada, İstanbul ili sınırları içerisinde son yıllarda el konulan yasadışı avcılıkta kullanılan teknelerin teknik özellikleri incelenmiş, elde edilen veriler doğrultusunda yasadışı balıkçılığın yapısal özellikleri ve bölgesel dağılımı değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu teknelerin avcılık türüne uygunluk veya ekonomik zorunluluklar doğrultusunda tekne sahipleri ve donatanları tarafından yapılan seçimler dikkate alınarak, Tam Boy (Loa) / Kütük Eni (B) oranları analiz edilmiş ve bu oranlar üzerinden yasadışı avcılık faaliyetlerinin karakteristik yapısının ortaya konulması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

Çalışmada kullanılan verilerin kaynağını, İstanbul İl Tarım ve Orman Müdürlüğü Su Ürünleri Şube Müdürlüğü'ne ait resmi evrak ve dosya verileri oluşturmaktadır. Aynı zamanda bu hususta daha önce yapılmış olan akademik çalışmalardan elde edilen veriler de ikinci materyali oluşturmuştur. İstanbul İl Tarım ve Orman Müdürlüğü verilerine göre 1 Ocak 2020 tarihi ile 25 Haziran 2025 tarihleri arasında İstanbul sularında çeşitli vasıflarda 227 adet tekneye el konulmuştur. Çalışmamız, bu teknelerden Tam Boy ve Kütük Eni bilgisi verilen 51 adet trol avcısı ve 35 adet çift kabuklu yumuşakça ve deniz salyangozu avcısı tekneyi kapsamakta olup, bu bilgilerin yer almadığı yahut genel avcılık karakteristiği hakkında bilgi veremeyecek tekneler çalışma kapsamı dışında kalmıştır. Tam boy ve kütük eni bilgisi verilen tekneler, Loa/B oranlarına dair verileri elde edilerek senelere, boy aralıklarına ve tekne yapısına göre yasadışı avcılık karakteristiğinin değişimi anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu karakteristik üzerinde muhtemel etki faktörleri de değerlendirilirken, balıkçılık sektörüne dair yapıcı önerilerde bulunulmuştur.

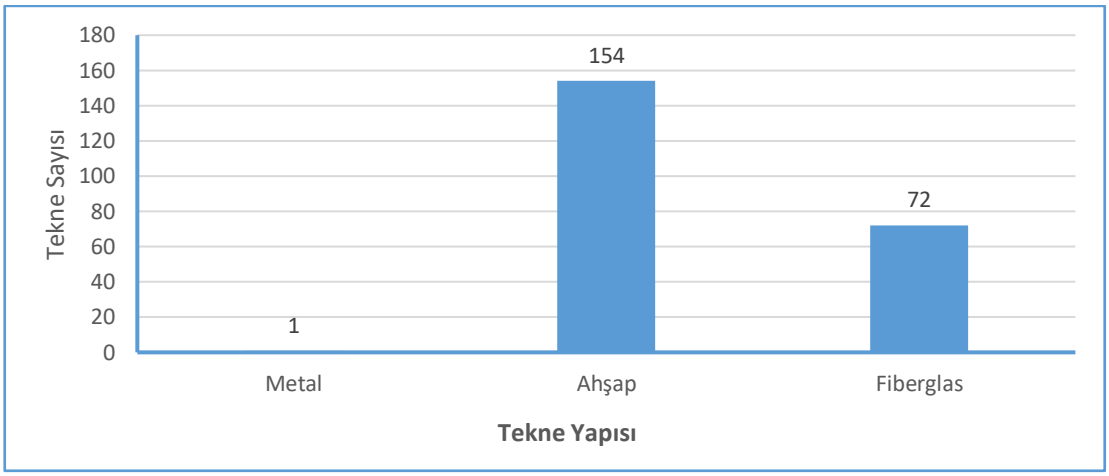
3. BULGULAR

İstanbul İl Tarım ve Orman Müdürlüğü Su ürünleri Şube Müdürlüğü verilerine göre 01/01/2020-25/06/2025 tarihleri arasında yasadışı avcılık gerekçesiyle 227 adet tekneye el konulmuş olup bu teknelerin 128 adedi (%56,39) çift kabuklu yumuşakça (kara midye, beyaz kum midyesi, kum şırlanı) ve deniz salyangozu avcısı, 73 adedi (%32,16) trol avcısı, 25 adedi (%11,01) içsu balığı avcısı ve 1 adedi (%0,44) ise uzatma (ağ) avcısıdır (Şekil 1).



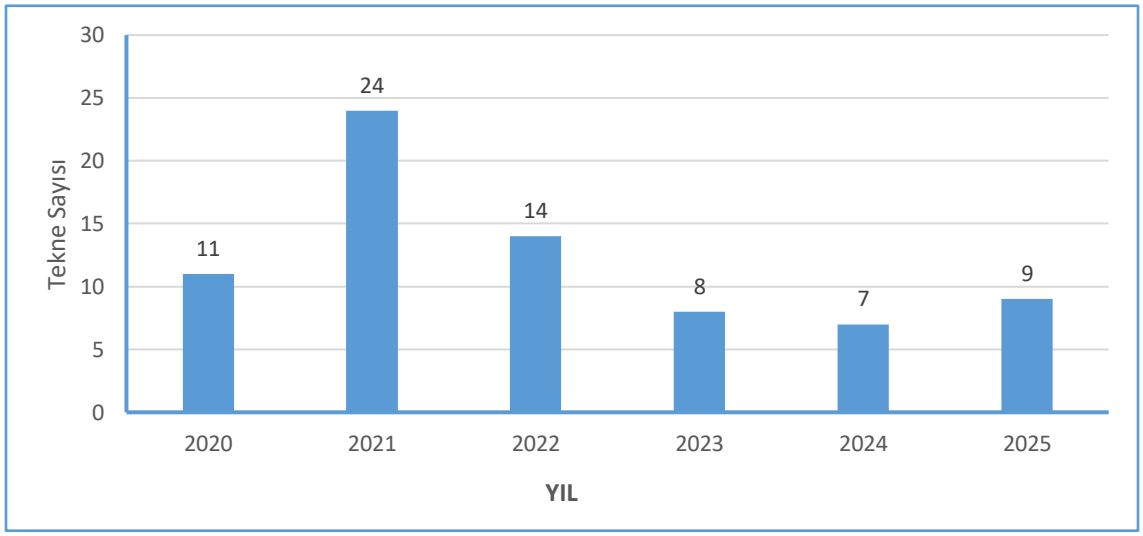
Şekil 1. 2020-2025 Yılları Arasında İstanbul Sularında El Konulan Tekne Sayıları

Toplamda yasadışı avcılık nedeniyle el konulan teknelerin 154 adedi (%67,84) ahşap, 72 adedi (%31,72) fiberglas ve 1 adedi (%0,44) metal malzemeden imal edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. 2020-2025 Yılları Arasında İstanbul Sularında El Konulan Tekne Yapım Malzemeleri

El konulan toplam 73 trol avcısı teknenin 11'i 2020 yılında, 24'ü 2021 yılında, 14'ü 2022 yılında, 8'i 2023 yılında, 7'si 2024 yılında ve 9'u 2025 yılında el konulmuş teknelerdir (Şekil 3). 2025 yılına ait verilerin 25 Haziran tarihi ile sınırlı olması bu yıla ait verinin toplamı yansıtmadığını ifade etmektedir.



Şekil 3. 2020-2025 Yılları Arasında İstanbul Sularında El Konulan Trol Avcısı Tekne Sayıları

Bu teknelerden toplamda 51 adet trol avcısı tekne ile 35 adet çift kabuklu yumuşakça ve deniz salyangozu avcısı tekneye dair tam boy ve kütük eni bilgisi mevcut olduğundan, tüm değerlendirmeler bu teknelerin Loa/B oranları üzerinden gerçekleştirilmiştir. İçsu ve uzatma avcısı 26 tekne, Loa/B oranına dair yeterli veri bulunmadığı için çalışma kapsamımız dışında tutulmuştur.

2020 yılındaki yasadışı trol avcılığında genellikle 10-11 m tam boy ve 3-3,5 m kütük eni bandındaki teknelerin tercih edildiği görülürken, ortalama tam boy 11,81 m, kütük eni 3,73 m ve tam boy/kütük eni oranı ise 3,17 olarak tespit edilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. 2020 Yılına Ait Trol Avcısı Teknelerin Tam Boy (Loa) / Kütük Eni(B) Oranı

Tekne No	Tam Boy(m) (Loa)	Kütük Genişliği (m) (B)	Loa/B Oranı
1	10,55	3,55	2,97

2	17,55	5,25	3,34
3	12,9	3,2	4,03
4	10,8	3,8	2,84
5	9	3	3
6	11,2	4,3	2,6
7	10,8	3	3,6
8	11,75	3,88	3,02
Ort.	**11,81**	**3,73**	**3,17**

2021 yılındaki yasadışı trol avcılığında 8,25-14,9 m tam boy aralığındaki değişik tekne boylarının tercih edildiği,12 m olan ortalama tekne boyunun bir önceki seneye göre pek değişmediği, fakat kütük genişliği değerlerinin artmasından ötürü (ortalama artış oranı %16,35) tam boy/kütük eni oranının %12,93 azalarak 2,76 olduğu tespit edilmiştir (Tablo 2).

2022 yılındaki yasadışı trol avcılığında bir önceki seneye göre ortalama tam boy %12,83 azalarak 10,46 m olurken, ortalama kütük eni %7,37 azalarak 4,02 m olmuş, bu değerlere bağlı tam boy/kütük eni oranı ise çok az azalarak 2,6 olmuştur (Tablo 3).

Tablo 2. 2021 Yılına Ait Trol Avcısı Teknelerin Tam Boy (Loa) / Kütük Eni(B) Oranı

Tekne No	Tam Boy(m) (Loa)	Kütük Genişliği (m) (B)	Loa/B Oranı
1	14,5	5,4	2,68
2	12,5	4,5	2,77
3	14,9	5	2,98
4	11,58	4,4	2,63
5	14,8	4,75	3,11
6	12,6	4,8	2,62
7	10,4	4,12	2,52
8	14,5	5,4	2,68
9	9,42	3,55	2,65
10	10	3	3,33
11	10	3,5	2,85
12	8,25	3,25	2,53
13	12,6	4,8	2,62
Ort.	**12**	**4,34**	**2,76**

Tablo 3. 2022 Yılına Ait Trol Avcısı Teknelerin Tam Boy (Loa) / Kütük Eni (B) Oranı

Tekne No	Tam Boy(m) (Loa)	Kütük Genişliği (m) (B)	Loa/B Oranı

1	15	5,99	2,5
2	9	3,6	2,5
3	9,36	3,9	2,4
4	8,6	3	2,86
5	14,8	5,25	2,81
6	10,2	4,1	2,48
7	12	4,3	2,79
8	8,04	3,05	2,63
9	7,2	3,05	2,36
Ort.	**10,46**	**4,02**	**2,6**

2023 yılındaki yasadışı trol avcılığında bir önceki seneye göre ortalama tam boy %8,5 azalıp 9,57 m olurken, ortalama kütük %27,11 azalarak tam boy/kütük eni oranını %26,53 artışla 3,29 yapmıştır (Tablo 4).

Tablo 4. 2023 Yılına Ait Trol Avcısı Teknelerin Tam Boy (Loa) / Kütük Eni (B) Oranı

Tekne No	Tam Boy(m) (Loa)	Kütük Genişliği (m) (B)	Loa/B Oranı
1	9,4	2,75	3,41
2	8	2,8	2,85
3	7,85	2,95	2,66
4	8,8	3,1	2,83
5	13,3	4,5	2,95
6	10,2	4,19	2,43
7	13,3	4,5	2,95
Ort.	**10,12**	**3,54**	**2,86**

2024 yılındaki yasadışı trol avcılığında bir önceki seneye göre ortalama tam boy %5,74 artışla 10,12 m olmuş, ortalama kütük eni ise %20,81 yükselerek 3,54 m'ye gelmiştir. Bu durum tam boy/kütük eni oranını %13,06 düşürerek 2,86 yapmıştır (Tablo 5).

Tablo 5. 2024 Yılına Ait Trol Avcısı Teknelerin Tam Boy (Loa) / Kütük Eni (B) Oranı

Tekne No	Tam Boy(m) (Loa)	Kütük Genişliği (m) (B)	Loa/B Oranı
1	7,68	3	2,56
2	11,05	3,8	2,9
3	11,7	3,3	3,54
4	9	2,37	3,79
5	7,8	2,45	3,18
6	10,2	2,7	3,77

Ort.	**9,57**	**2,93**	**3,29**

2025 yılındaki yasadışı trol avcılığında bir önceki seneye göre ortalama tam boy %13,33 azarak 8,77 m olmuş, ortalama kütük eni ise %8,47 azalarak 3,24 m'ye düşmüştür. Bu durum tam boy/kütük eni oranını %5,59 düşürerek 2,7 yapmıştır (Tablo 6).

Tablo 6. 2025 Yılına Ait Trol Avcısı Teknelerin Tam Boy (Loa)/ Kütük Eni (B) Oranı

Tekne No	Tam Boy(m) (Loa)	Kütük Genişliği (m) (B)	Loa/B Oranı
1	8,25	3,3	2,5
2	9,48	3,3	2,87
3	10,3	3,55	2,9
4	7,68	3	2,56
5	7,74	3,1	2,49
6	9,08	3,14	2,89
7	8	3	2,66
8	9,63	3,55	2,71
Ort.	**8,77**	**3,24**	**2,7**

Çift kabuklu yumuşakça ve deniz salyangozu avcısı teknelerde ise senelere göre değil tekne yapım malzemesi ve tekne uzunluğuna göre tam boy/kütük eni oranının değişkenliği söz konusu olduğundan, bu değerler dikkate alınarak hazırlanan Excel tabloları ortaya aşağıdaki bulguları ortaya çıkarmıştır.

Yasadışı çift kabuklu yumuşakça ve deniz salyangozu avcısı ahşap teknelerde 5,01-6 m boy aralığında el konulan tekne olmadığı, en çok rastlanan tam boy aralıklarının ise %36 ile 6,01-7 m, %24 ile 7,01-8 m ve %20 ile 4,01-5 m olduğu görülmüştür (Tablo 7). Yasadışı avcılıkta en çok tercih edilen 4,01-5 m, 6,01-7 m ve 7,01-8 m tam boy aralıklarındaki teknelerin daha yüksek (Sırasıyla 3,49- 3,7 ve 3,82) tam boy/kütük eni oranlarına sahip olduğu görülürken; 3,01-4 m, 8,01-9 m ve 9,01 m ve üstü tam boy aralıklarındaki teknelerin daha düşük tam boy/kütük eni oranına sahip olduğu (Sırasıyla 2,25 – 2,68 ve 2,95) görülmektedir (Tablo 7).

Tablo 7. Çift Kabuklu Yumuşakça ve Den. Sal. Avcısı Ahşap Teknelerin Tam Boy (Loa) / Kütük Eni (B) Oranı

Tekne No	(3,01-4 m)	(4,01-5 m)	(6,01-7 m)	(7,01-8 m)	(8,01-9 m)	(9,01 ve + m)
1	2,25	2,75	3,76	6,25	2,57	2,95
2		4,47	3,42	3	2,92	
3		2,94	3,50	3,59	2,57	
4		4	3,19	3		
5		3,33	3,14	3,94		
6			3,25	3,19		
7			3,42			
8			3,04			

9			3,61			
10			3,04			
Ort.	**2,25**	**3,49**	**3,70**	**3,82**	**2,68**	**2,95**

(Tabloda boş kalan kısımlar, bahse konu boy aralığına karşılık gelen tekne olmadığını gösterir)

Yasadışı çift kabuklu yumuşakça ve deniz salyangozu avcısı fiber teknelerin ahşap teknelere göre daha kısa olduğu görülürken, bu teknelerin büyük çoğunluğunun (%80'i) 4,01-5 metre tam boy aralığı bandında olduğu ve bu gruptaki teknelerde ortalama tam boy/kütük eni oranının 2,66 olduğu tespit edilmiştir (Tablo 8).

Tablo 8. Çift Kabuklu Yumuşakça ve Den. Sal. Avcısı Fiber Teknelerin Tam Boy (Loa) / Genişlik (B) Oranı

Tekne No	(3,01-4 m)	(4,01-5 m)	(5,01-6 m)
1	2,5	2,5	3
2		2,5	
3		2,81	
4		2,81	
5		2,52	
6		2,87	
7		2,81	
8		2,5	
Ort.	**2,5**	**2,66**	**3**

(Tabloda boş kalan kısımlar, bahse konu boy aralığına karşılık gelen tekne olmadığını gösterir)

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tarım ve Orman Bakanlığı İstanbul İl Tarım ve Orman Müdürlüğü verilerine göre, 1 Ocak 2020 – 25 Haziran 2025 tarihleri arasında, çeşitli ebat ve sınıflardaki toplam 227 tekneye 1380 Sayılı Su Ürünleri Kanunu'na aykırı faaliyetleri nedeniyle, aynı Kanun'un 36. maddesi uyarınca el koyma işlemi uygulanmıştır. El konulan teknelerin büyük çoğunluğuna ait Tam Boy (Loa) bilgisine ulaşılmış, 88 teknede ise Kütük Eni (B) verisi kayıt altına alınmıştır. Bu teknelerden ikisi içsu avcısı olup, sınıf temsil kabiliyeti zayıf olduğundan çalışmaya dahil edilmemiştir. Sonuç olarak, 51'i trol, 35'i çift kabuklu yumuşakça ve deniz salyangozu avcısı olmak üzere toplam 86 tekne üzerinde yapılan Loa/B oranı analizinde, trol teknelerinin yıllar itibarıyla oransal değişimler gösterdiği belirlenmiştir.

Küçük balıkçı tekneleri üzerine yapılmış benzer bir çalışma bulunmamakla birlikte, Saral (2023) tarafından 40–60 metre aralığındaki büyük balıkçı tekneleri üzerinde yapılan araştırma, bu çalışmada referans olarak alınmıştır. Gemi inşa ustaları ve sektör temsilcilerinden alınan bilgiler, küçük ve büyük balıkçı teknelerinin Loa/B oranlarının Karadeniz tipi teknelerde benzeştiğini göstermektedir. Bu nedenle, Saral (2023)'ın bulguları, küçük ölçekli tekneler için uyarlanarak değerlendirilmiştir.

Saral (2023)'ün çalışmasında, 12 teknenin endaze planına dayanarak yapılan ölçümler sonucunda, Loa/B oranı arttıkça toplam direnç değerlerinin azaldığı, dolayısıyla tekne hızının arttığı belirlenmiştir. Derinlik

(D) arttıkça direnç artmakta; gemi hızı ise düşmektedir. Çalışmada ayrıca, Tam Boy (Loa) artışının sürtünme direncini artırdığı, buna karşılık basınç direncini azalttığı vurgulanmıştır. Bu bulgular, balıkçı teknelerinde boy ve oran ilişkilerinin doğrudan performans ve yakıt verimliliğini etkilediğini göstermektedir.

Saral (2023), 1990'lı yıllardan günümüze Türk balıkçı teknelerinde Loa/B oranının belirgin biçimde düştüğünü bildirmiştir. 1990–2000 yılları arasında yaklaşık 3,50 olan oran, günümüzde 2,25 seviyelerine kadar gerilemiştir. Bu durum, tekne genişliklerinin boylarına oranla daha fazla artırıldığını, dolayısıyla hız ve performans yerine hacim ve taşıma kapasitesine öncelik verildiğini göstermektedir. 2002 yılından itibaren yeni ruhsat tezkeresi verilmemesi ve yalnızca %20 oranında boy artışına izin verilmesi, tekne sayısında artışın önüne geçmiştir. Ancak bu durum, mevcut teknelerde hacim artırımı yoluyla kapasite büyütülmesine, dolayısıyla Loa/B oranının düşmesine neden olmuştur.

2020–2025 yılları arasındaki değişimler incelendiğinde, Loa/B oranlarının yıllara göre dalgalı bir seyir izlediği görülmektedir.

2020 yılında, 4,03 gibi yüksek ve 2,6 gibi düşük oranlara rastlanması, yasadışı trol avcılarının temin edebildikleri tekneleri, hidrodinamik uygunluğu gözetmeden kullandıklarını düşündürmektedir.

2021 yılında, tam boy değerleri sabit kalmasına rağmen kütük genişlikleri artmış, Loa/B oranı yaklaşık %13 oranında azalmıştır. Bu durum, daha geniş güverteli teknelerin tercih edildiğini veya mevcut teknelerin dönüştürülerek kullanıldığını göstermektedir.

2022 yılında hem tam boy hem kütük eni değerlerinde küçük değişimler olmuş, Loa/B oranı göreceli olarak sabit kalmıştır. Bu da yasadışı trol avcılığında belirli bir teknik standardın oluştuğuna işaret etmektedir.

2023 yılında, Loa/B oranlarının önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Bu durum, denetimlerin sıkılaşması sonucu daha küçük ve hızlı teknelere yönelimi yansıtmaktadır.

2024 yılında, kütük eninin belirgin şekilde artmasıyla Loa/B oranı 2,86'ya ulaşmıştır. Bu değişim, av miktarını artırmak ve daha geniş güverte alanı sağlamak amacıyla yapılan tercihlerle ilişkilendirilebilir.

2025 yılında, Loa/B oranı yeniden düşerek yaklaşık 2,7 seviyesine inmiştir. Bu oran, yasadışı avcılıkta hız ve depolama kapasitesi arasında optimum dengeyi sağlayan bir değere işaret etmektedir.

Çift kabuklu yumuşakça ve deniz salyangozu avcılığında kullanılan teknelerde ise Loa/B oranı, yıllara göre daha stabil seyretmiştir. Ahşap teknelerde ortalama oranlar 3,49–3,82 arasında değişmiş, fiber teknelerde ise 2,5–3,0 aralığında sabit kalmıştır. Ahşap teknelerin çoğu, düşük motor gücü ve yıpranmış yapılarıyla sınırlı performans sergilerken; fiber tekneler hafif, düşük maliyetli ve daha hızlı olmaları nedeniyle ekonomik zorunluluk sonucu tercih edilen tekneler olarak öne çıkmıştır.

Genel olarak 2000'li yıllardan itibaren motor gücündeki artış, küçük ölçekli balıkçı teknelerinin av verimliliğini artırmıştır. Ancak artan hız ve yakıt tüketimi, işletme maliyetlerini yükseltmiş, buna bağlı olarak balıkçılar daha fazla denizde kalma ve daha çok avlanma yoluyla kârlılığı sürdürmeye çalışmıştır. Bu durum hem av baskısının artmasına hem de yasadışı faaliyetlerin çoğalmasına neden olmuştur.

Sonuç olarak, çalışmamız sonucunda elde edilen verilere göre İstanbul sularında yasadışı avcılıkta kullanılan trol teknelerinde tercih edilen Tam Boy (Loa) / Kütük Eni (B) oranının 2,6 – 2,8 arasındaki değerler olduğu, çift kabuklu yumuşakça ve deniz salyangozu avcılığında ağırlıklı olarak 4-8 metre boy uzunluğundaki Loa/B oranı yaklaşık 3,5-3,8 ahşap teknelerin sürdürülebilir ve verimli bir avcılık açısından tercih edildiği, ekonomik imkânların el vermediği durumlarda kullanılan fiber teknelerde ise belirli bir Loa/B oranı standardı olmamakla birlikte, 4-5 metre uzunluğundaki 2,5 - 2,8 oranlı teknelerin piyasada çok bulunduğu için daha sık kullanıldığı tespit edilmiştir.

Yasadışı avcılığın önlenmesi için yalnızca denetimlerin artırılması değil, aynı zamanda küçük ölçekli balıkçılara yönelik ekonomik teşviklerin geliştirilmesi gerekmektedir. Düşük av miktarına sahip tekneler, kamu destekli programlarla makul bedeller karşılığında satın alınarak aktif tekne sayısı azaltılabilir.

Bununla birlikte, yasal çerçevede mevcut %20'lik boy artırım hakkı, belirli koşullar altında yeniden düzenlenebilir. Ayrıca, yeni tekne yapımına yönelik sıkı denetim ve kayıt zorunluluğu getirilerek hem imalat sürecinde hem de kullanım aşamasında etkin bir izleme sistemi oluşturulmalıdır. Bu önlemler, yasadışı avcılığın ekonomik cazibesini azaltacak ve Marmara Denizi özelinde sürdürülebilir balıkçılığa önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

ANONİM. (2019). Tarım ve Orman Bakanlığı Resmî Gazete, 22 Kasım 2019 Su Ürünleri Kanununda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun.

ANONİM. (2025). Tarım ve Orman Bakanlığı Elektronik Belge Yönetim Sistemi (EBYS) Verileri.

ANONİM. (2001). Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı Kurum İçi Genelge (Bilasayı).

AYDIN M. (2002). Türkiye Sularına Uygun Teknelerin Bilgisayara Destekli Dizaynı. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi Çalışması.

ÇELİKKALE, M.S., DÜZGÜNEŞ, E. ve CANDEĞER, A.F. (1993). Av Araçları ve Avlanma Teknolojisi, KTÜ Basımevi, Trabzon.

DEMİREL Y.K. (2002) Yüzey Kirliliğinin Gemi Direnci Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Çalışması,

DİNÇER A. C. (1996). Hamsi Avcılığında Kullanılan Karadeniz Tipi Balıkçı Gemilerinin Simülasyon Dizaynı ve Ekonomik Analizi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi Çalışması.

MEGEP. (2008). Balıkçılık (Balıkçı Gemileri ve Donanımları). Ankara

PEŞMAN E. (2002). Türkiye Sularına Uygun Balıkçı Gemilerinin Bilgisayar Destekli Dizaynı. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi Çalışması.

SARAL, D. (2016). Yumrubaşın Balıkçı Gemilerinin Direncine Olan Etkisinin Sistematik Olarak İncelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Çalışması.

SARAL, D. (2023) Karadeniz Tipi Balıkçı Gemilerinin Form Optimizasyonu. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi Çalışması.